



Comparación de Software Propietario frente a Soluciones de Código Abierto para la modelación de Sistemas de Alcantarillado y Drenaje Urbano: Evaluación de Desempeño.

Jhonatan Steven Taborda Quiroz

Tesis de pregrado para optar al título de Ingeniero Sanitario

Trabajo de Grado

Asesor

Neiler de Jesús Medina Peña, PhD

Universidad de Antioquia

Facultad de ingeniería, Escuela Ambiental

Ingeniería Sanitaria

Medellín

2024

Cita	(Taborda, 2024)
Referencia	(Taborda Quiroz, Jhonatan Steven, 2024). <i>Comparación de Software Propietario frente a Soluciones de Código Abierto para la modelación de Sistemas de Alcantarillado y Drenaje Urbano: Evaluación de Desempeño</i> [Trabajo de grado]. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.
Estilo APA 7 (2020)	



Centro de Documentación Ingeniería (CENDOI)

Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

Rector: John Jairo Arboleda Céspedes

Decano/Director: Julio César Saldarriaga Molina

Jefe departamento: Lina María Berrouet Cadavid

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Tabla de contenido

Lista de figuras	1
Siglas, acrónimos y abreviaturas.....	4
Resumen	5
Abstract.....	6
1. Introducción.....	7
2. Objetivos	9
2.1 Objetivo general.....	9
2.2 Objetivos específicos.....	9
3 Marco teórico	10
3.1 Gestión de Inundaciones Urbanas:	10
3.2 Modelado Hidráulico:.....	10
3.3 Modelos Hidráulicos 1D vs. 2D:	11
3.4 Comparación de Software de Código Abierto y Propietario para la Gestión de Inundaciones Urbanas:.....	11
4 Descripción de área de estudio y problemática.....	13
4.1 Área de estudio.	13
4.2 Inundaciones en el área de estudio.	16
5 Metodología.....	18
5.1 Recolección y procesamiento de información.	18
5.1.1 Geodatabase del sistema de alcantarillado.	19
5.1.2 Problemáticas en recolección de datos.	21
5.1.3 Organización y eliminación de datos.....	22
5.1.4 Lluvias de diseño.....	24
5.2 Configuración de los modelos hidráulicos 1D.....	28

5.2.1 Configuración de los modelos 1D.....	29
5.3 Escenarios de modelación.....	44
5.3.1 Escenario 1: EPA-SWMM lluvia real vs SewerGEMS explícito lluvia real.	45
5.3.2 Escenario 2: EPA-SWMM lluvia real con cambio climático vs SewerGEMS explícito lluvia real con cambio climático.....	45
5.3.3 Escenario 3: EPA-SWMM IDF vs SewerGEMS explícito IDF.	46
5.3.4 Escenario 4: EPA-SWMM lluvia IDF con cambio climático vs SewerGEMS explícito lluvia IDF real con cambio climático.....	47
5.3.5 Escenario 5: Comparación de los motores de cálculo explícito SWMM e implícito en SewerGEMS	48
6 Resultados.....	49
6.1 Escenario 1: EPA-SWMM lluvia real vs SewerGEMS explícito lluvia real.	49
6.2 Escenario 2: EPA-SWMM lluvia real con cambio climático vs SewerGEMS explícito lluvia real con cambio climático.	53
6.3 Escenario 3: EPA-SWMM lluvia IDF vs SewerGEMS explícito lluvia IDF.	57
6.4 Escenario 4: EPA-SWMM lluvia IDF con cambio climático vs SewerGEMS explícito lluvia IDF real con cambio climático.	61
6.5 Escenario 5: Comparación de los motores de cálculo explícito SWMM e implícito en SewerGEMS con la lluvia de diseño con cambio climático.	65
7 Conclusiones	72
8 Referencias	76

Lista de tablas

Tabla 1. Tabla de Excel donde se muestra las cámaras de inspección inundadas con el motor implícito.....	68
--	----

Lista de figuras

Figura 1. Localización del área de estudio.	14
Figura 2. Área de estudio dentro de la cuenca granizal.	16
Figura 3. Descripción de la metodología a implementar en este trabajo.	18
Figura 4. Sistema de alcantarillado cuenca granizal.	19
Figura 5. Área de estudio con el tramo de alcantarillado.	21
Figura 6. Parámetros de las curvas IDF en jurisdicción EPM.	25
Figura 7. Hietograma lluvia 11 de junio 2021 (mm/h).	26
Figura 8. Hietograma lluvia de diseño EPM (mm/h).	27
Figura 9. Red final del área de estudio.	31
Figura 10. Datos del elemento tipo cámara en EPA-SWMM.	32
Figura 11. Cámaras de inspección en EPA-SWMM.	33
Figura 12. Datos del elemento tipo descarga en EPA-SWMM.	34
Figura 13. Descargas en EPA-SWMM.	34
Figura 14. Datos del elemento tipo tuberías en EPA-SWMM.	36
Figura 15. Tuberías en EPA-SWMM Con su identificador único.	36
Figura 16. Aliviaderos en EPA-SWMM con su identificador único.	37
Figura 17. Datos del elemento tipo pluviómetro en EPA-SWMM.	37
Figura 18. Pluviómetro en EPA-SWMM con su identificador único.	38
Figura 19. Serie temporal con sus datos de ingreso en EPA-SWMM.	39
Figura 20. Datos del elemento tipo pluviómetro en EPA-SWMM.	40
Figura 21. Subcuencas en EPA-SWMM con su identificador único.	40
Figura 22. Datos de agua residual dentro de EPA-SWMM.	41

Figura 23. Paso de importación dentro de SewerGEMS del formato EPA-SWMM.....	43
Figura 24. Modelo importado en SewerGEMS.....	43
Figura 25. Hietograma lluvia real sin cambio climático.....	45
Figura 26. Hietograma lluvia real con cambio climático.	46
Figura 27. Hietograma lluvia de diseño sin cambio climático.....	47
Figura 28. Hietograma lluvia de diseño con cambio climático.....	47
Figura 29. Flujo máximo en EPA-SWMM de la descarga D-9345408.....	49
Figura 30. Flujo máximo en SewerGEMS de la descarga D-9345408.....	50
Figura 31. Flujo máximo en EPA-SWMM de la descarga D-9102657.....	50
Figura 32. Flujo máximo en SewerGEMS de la descarga D-9102657.....	51
Figura 33. Datos arrojados por EPA-SWMM de la cámara de inspección inundada.....	51
Figura 34. Datos arrojados por SewerGEMS de la cámara de inspección inundada.....	51
Figura 35. Perfil generado en EPA-SWMM, para cámara de inspección inundada.....	52
Figura 36. Perfil generado en SewerGEMS, para cámara de inspección inundada.....	52
Figura 37. Flujo máximo en EPA-SWMM de la descarga D-9345408.....	53
Figura 38. Flujo máximo en SewerGEMS de la descarga D-9345408.....	55
Figura 39. Flujo máximo en EPA-SWMM de la descarga D-9102657.....	55
Figura 40. Flujo máximo en SewerGEMS de la descarga D-9102657.....	55
Figura 41. Datos arrojados por EPA-SWMM de las cámaras de inspección inundada.	56
Figura 42. Datos arrojados por SewerGEMS de las cámaras de inspección inundada.	56
Figura 43. Perfil generado en EPA-SWMM, para cámaras de inspección inundadas.....	57
Figura 44. Perfil generado en SewerGEMS, para cámaras de inspección inundadas.	57
Figura 45. Flujo máximo en EPA-SWMM de la descarga D-9345408.....	58
Figura 46. Flujo máximo en SewerGEMS de la descarga D-9345408.....	58

Figura 47. Datos arrojados por EPA-SWMM de las cámaras de inspección inundadas.....	59
Figura 48. Datos arrojados por SewerGEMS de las cámaras de inspección inundadas.....	59
Figura 49. Cámaras de inspección inundadas desde EPA-SWMM.....	60
Figura 50. Perfil generado en EPA-SWMM, para cámaras de inspección inundadas.....	60
Figura 51. Perfil generado en SewerGEMS, para cámaras de inspección inundadas.	61
Figura 52. Flujo máximo en EPA-SWMM de la descarga D-9345408 con cambio climático.....	62
Figura 53. Flujo máximo en SewerGEMS de la descarga D-9345408 con cambio climático.....	62
Figura 54. Datos arrojados por EPA-SWMM de las cámaras de inspección inundadas.....	63
Figura 55. Datos arrojados por SewerGEMS de las cámaras de inspección inundadas.....	63
Figura 56. Cámaras de inspección inundadas desde EPA-SWMM.....	64
Figura 57. Perfil generado en EPA-SWMM, para cámaras de inspección inundadas.....	64
Figura 58. Perfil generado en SewerGEMS, para cámaras de inspección inundadas.	65
Figura 59. Flujo máximo de la descarga D-9345408 con el motor explícito.....	66
Figura 60. Flujo máximo de la descarga D-9345408 con el motor implícito.	66
Figura 61. Flujo máximo de la descarga D-9102657 con el motor explícito.....	67
Figura 62. Flujo máximo de la descarga D-9102657 con el motor implícito.	67
Figura 63. Datos arrojados por el motor explícito de las cámaras de inspección inundadas.	68
Figura 64. Perfil en evento de inundación con el motor explícito.	69
Figura 65. Perfil en evento de inundación con el motor implícito.....	69
Figura 66. Imagen donde muestra el error de continuidad del motor explícito con 34 segundos.	71
Figura 67. Imagen donde muestra el error de continuidad del motor implícito con 618 segundos.	71

COMPARACIÓN DE SOFTWARE PROPIETARIO FRENTE A SOLUCIONES DE CÓDIGO ABIERTO PARA LA MODELACIÓN DE SISTEMAS DE ALCANTARILLADO Y DRENAJE URBANO...

Siglas, acrónimos y abreviaturas

1D	Modelo hidráulico en una dimensión.
2D	Modelo hidráulico en dos dimensiones.
1D/2D	Modelo hidráulico que acopla los modelos en 1D Y 2D.
EPA	Environmental Protection Agency.
EPM	Empresas Públicas de Medellín.
IPID	Integrated Project Information Delivery (Entrega Integrada de Información del Proyecto)
ID	Identification (Identificación única)
IDF	Intensidad, Duración y Frecuencia
SWMM	Storm Water Management Model.
SUDS	Sustainable Urban Drainage Systems (Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible)
UdeA	Universidad de Antioquia

COMPARACIÓN DE SOFTWARE PROPIETARIO FRENTE A SOLUCIONES DE CÓDIGO ABIERTO PARA LA MODELACIÓN DE SISTEMAS DE ALCANTARILLADO Y DRENAJE URBANO...

Resumen

Este trabajo de grado se enfocó en comparar el desempeño de software propietario y soluciones de código abierto para la modelación de sistemas de alcantarillado y drenaje urbano. El software propietario, controlado por empresas y con costos asociados, se contrasta con el software de código abierto, que permite acceso y modificación libre. La comparación analiza la capacidad de ambos tipos de software para modelar estos sistemas, considerando factores como la precisión de las simulaciones, la facilidad de uso, la disponibilidad de funciones específicas y el costo de adquisición. La evaluación de desempeño incluyó pruebas de simulación con datos reales y escenarios hipotéticos para determinar la precisión y confiabilidad de los resultados obtenidos. Además, se consideraron aspectos como la flexibilidad del software para adaptarse a diferentes condiciones y su compatibilidad con otros sistemas y herramientas utilizadas en ingeniería. El objetivo final de este trabajo fue el de ofrecer información valiosa a profesionales y organizaciones en el diseño y gestión de sistemas de alcantarillado y drenaje urbano, facilitando la toma de decisiones informadas sobre la selección del software más adecuado para sus necesidades específicas.

Palabras clave: Drenaje urbano, Sistemas de alcantarillado, Software Propietario, Software de Código abierto.

COMPARACIÓN DE SOFTWARE PROPIETARIO FRENTE A SOLUCIONES DE CÓDIGO ABIERTO PARA LA MODELACIÓN DE SISTEMAS DE ALCANTARILLADO Y DRENAJE URBANO...

Abstract

This thesis focused on comparing the performance of proprietary software and open-source solutions for modeling urban sewer and drainage systems. Proprietary software, controlled by companies and with associated costs, is contrasted with open-source software, which allows free access and modification. The comparison analyzes the ability of both types of software to model these systems, considering factors such as simulation accuracy, ease of use, availability of specific functions, and acquisition cost. The performance evaluation included simulation tests using real data and hypothetical scenarios to determine the accuracy and reliability of the results obtained. Additionally, aspects such as the software's flexibility to adapt to different conditions and its compatibility with other systems and tools used in engineering were considered. The ultimate goal of this work was to provide valuable information to professionals and organizations in the design and management of urban sewer and drainage systems, facilitating informed decision-making regarding the selection of the most suitable software for their specific needs.

Keywords: Urban drainage, Sewer systems, Proprietary software, Open-source software.

1. Introducción

La gestión efectiva de inundaciones urbanas representa uno de los principales desafíos en el desarrollo y la planificación urbana contemporánea. Con el crecimiento acelerado de las ciudades y el aumento de eventos climáticos extremos, la necesidad de abordar adecuadamente los riesgos asociados con las inundaciones se vuelve cada vez más apremiante (La Agencia De La Onu Para Los Refugiados, 2024). En este contexto, la aplicación de modelos hidráulicos y herramientas de simulación se presenta como una estrategia fundamental para evaluar, prevenir y mitigar los impactos de las inundaciones en entornos urbanos (Lameche et al., 2023).

A lo largo de las últimas décadas, numerosos estudios han investigado y comparado diferentes enfoques y metodologías para el modelado hidráulico en el contexto de la gestión de inundaciones urbanas. Entre estos, destacan investigaciones como las llevadas a cabo por Crispino, Gisonni, & Iervolino (2014) y Leandro, Chen, Djordjević, & Savić (2009), quienes exploraron la eficacia y las limitaciones de modelos hidráulicos 1D y 2D, así como la importancia del acoplamiento entre sistemas de alcantarillado y superficie para una evaluación precisa de los riesgos de inundación en entornos urbanos (Saldarriaga et al., 2021)). Además, investigaciones como la realizada por Saldarriaga, Zambrano, Herrán, & Iglesias-Rey (2021) han abordado la selección óptima de disposiciones de redes de alcantarillado, considerando factores clave como la topografía del terreno y la red vial, para una gestión más efectiva de las inundaciones en áreas urbanas.

Asimismo, estudios como el de Xie et al. (2019) han examinado la simulación de procesos hidrológicos en infraestructuras verdes, como los techos verdes, utilizando diferentes herramientas de simulación. Estos análisis proporcionan una comprensión más profunda sobre las capacidades y limitaciones de las herramientas de modelado hidráulico en entornos urbanos. En este contexto, este trabajo se propone explorar y analizar críticamente los avances recientes en el campo del modelado hidráulico aplicado a la gestión de inundaciones urbanas, con el objetivo de contribuir al desarrollo de enfoques más efectivos y sostenibles para enfrentar este desafío creciente en la planificación y gestión urbana contemporánea (Infraestructura Verde Urbana | Biodiversidad 2020, n.d.).

COMPARACIÓN DE SOFTWARE PROPIETARIO FRENTE A SOLUCIONES DE CÓDIGO ABIERTO PARA LA MODELACIÓN DE SISTEMAS DE ALCANTARILLADO Y DRENAJE URBANO...

Este trabajo de grado se realiza con el objetivo de comparar dos software de modelación hidráulica: Epa-SWMM (Storm Water Management Model (SWMM) | US EPA, 2024) y SewerGems Chintana (2024). La comparación entre estos dos programas nos permitirá obtener una visión más precisa sobre su funcionalidad y desempeño, lo cual es fundamental para alcanzar los objetivos planteados en nuestra investigación.

Para llevar a cabo esta comparación, se seleccionó un tramo de la cuenca Granizal de Medellín, específicamente del barrio Villa Niza, comuna 2. Esta área presenta características geográficas significativas, como un alta pendiente, que la hacen particularmente relevante para nuestro estudio (Medellín Modelo De Transformación Urbana Pui Proyecto Urbano Integral., 2015). Además, en esta zona se han registrado emergencias relacionadas con las lluvias invernales (Colombiano, 2023), lo que nos proporciona datos valiosos para plantear escenarios realistas y detallados en ambos modelos de simulación.

Es importante destacar que la zona elegida para esta investigación está incluida en un próximo proyecto de la Alcaldía de Medellín, conocido como Parques del Río Norte (PRN) (Construcción Parques Del Rio Norte - Alcaldía De Medellín, 2022). Este contexto no solo incrementa la relevancia del estudio, sino que también ofrece una oportunidad para que nuestros resultados contribuyan al desarrollo y éxito de dicho proyecto.

Mediante la utilización de Epa-SWMM (Storm Water Management Model (SWMM) | US EPA, 2024) y SewerGems Chintana (2024), esperamos analizar y comparar aspectos cruciales como la precisión en la modelación de eventos hidráulicos, la capacidad de manejo de emergencias por inundaciones, y la facilidad de uso de cada software. De esta manera, buscamos identificar cuál de estas herramientas proporciona mejores resultados y recomendaciones para su implementación en proyectos futuros, especialmente en áreas con características similares a la cuenca Granizal.

2. Objetivos

2.1 Objetivo general

Evaluar y comparar el desempeño, la funcionalidad y la facilidad de uso del software propietario y las soluciones de código abierto utilizadas para la modelación de sistemas de alcantarillado y drenaje urbano, con el objetivo de proporcionar información valiosa para los tomadores de decisiones en la selección de herramientas de software adecuadas para la gestión de infraestructuras urbanas.

2.2 Objetivos específicos

- Configuración y montaje de una red de alcantarillado urbano en dos programas de modelación, uno propietario y un programa de libre distribución.
- Evaluar la precisión y confiabilidad de las simulaciones generadas por ambos tipos de software mediante la comparación con escenarios de referencia
- Analizar la escalabilidad y flexibilidad de ambas opciones de software para adaptarse a diferentes escenarios y necesidades específicas de modelado de sistemas de alcantarillado y de drenaje urbano

3 Marco teórico

3.1 Gestión de Inundaciones Urbanas:

La gestión de inundaciones urbanas es un área crítica de la ingeniería que se enfoca en la prevención, evaluación y mitigación de los riesgos asociados con las inundaciones en entornos urbanos. Con el crecimiento de las ciudades y el cambio climático, el riesgo de inundaciones urbanas ha aumentado significativamente, lo que ha llevado a una mayor atención en los entes gubernamentales y de planificación urbana.

Según Crispino, Gisonni, & Iervolino (2014), la gestión de inundaciones urbanas implica una serie de actividades interrelacionadas que incluyen la identificación de áreas de riesgo, el diseño y mantenimiento de infraestructuras de drenaje, la implementación de medidas de mitigación, y la planificación de emergencias. Estas actividades requieren un enfoque integrado que combine conocimientos de hidrología, hidráulica, topografía, urbanismo y gestión de riesgos.

3.2 Modelado Hidráulico:

El modelado hidráulico es una herramienta fundamental en la gestión de inundaciones urbanas, ya que permite simular y predecir el comportamiento de los sistemas hidráulicos durante eventos de inundación. Los modelos hidráulicos se basan en principios físicos y matemáticos Caulfield (2021) para representar la dinámica de flujo de agua en ríos, arroyos, canales y sistemas de alcantarillado este último con escorrentía superficial.

Según Leandro, Chen, Djordjević, & Savić (2009), los modelos hidráulicos pueden ser clasificados en modelos unidimensionales (1D), bidimensionales (2D) o tridimensionales (3D), dependiendo de la complejidad del sistema y la precisión requerida. Los modelos 1D son ampliamente utilizados debido a su simplicidad y eficiencia computacional, mientras que los modelos 2D y 3D ofrecen una representación más detallada de la geometría y la dinámica del flujo, pero requieren más recursos computacionales.

3.3 Modelos Hidráulicos 1D vs. 2D:

La elección entre modelos hidráulicos 1D y 2D depende de varios factores, incluyendo la complejidad del sistema, la disponibilidad de datos, y los objetivos específicos del estudio. Los modelos 1D son adecuados para sistemas lineales con pendientes suaves y flujos dominados por la gravedad, como canales y alcantarillados.

Por otro lado, Crispino, Gisonni, & Iervolino (2014) señalan que los modelos 2D son más apropiados para áreas con topografía compleja, flujos tridimensionales, y fenómenos de inundación en entornos urbanos, donde la interacción entre la superficie y el sistema de drenaje es significativa. Aunque los modelos 2D son más computacionalmente intensivos y requieren más datos de entrada, ofrecen una representación más realista de los procesos de inundación y pueden proporcionar resultados más precisos en entornos urbanos complejos.

Se proporciona una comprensión sólida de los conceptos fundamentales relacionados con la gestión de inundaciones urbanas y el modelado hidráulico, lo que servirá como base para el desarrollo de la investigación en este campo.

3.4 Comparación de Software de Código Abierto y Propietario para la Gestión de Inundaciones Urbanas:

Con el avance de la tecnología y el desarrollo de software especializado, se han creado diversas herramientas para el modelado hidráulico y la gestión de inundaciones urbanas. Estas herramientas pueden clasificarse en dos categorías principales: software de código abierto y software propietario. El software de código abierto se caracteriza por tener su código fuente disponible públicamente, lo que permite a los usuarios acceder, modificar y distribuir el software según sus necesidades específicas.

Por otro lado, el software propietario se refiere a programas cuyo código fuente es propiedad de una empresa o entidad y no está disponible públicamente. Estos programas suelen requerir el pago de licencias y pueden tener restricciones en términos de acceso y uso.

COMPARACIÓN DE SOFTWARE PROPIETARIO FRENTE A SOLUCIONES DE CÓDIGO ABIERTO PARA LA MODELACIÓN DE SISTEMAS DE ALCANTARILLADO Y DRENAJE URBANO...

La elección entre software de código abierto y propietario para la gestión de inundaciones urbanas depende de varios factores, incluyendo la disponibilidad de recursos financieros, la complejidad del sistema hidráulico, y las necesidades específicas del usuario. Según Saldarriaga, Zambrano, Herrán, & Iglesias-Rey (2021), el software de código abierto suele ser preferido por su accesibilidad, flexibilidad y costo reducido, mientras que el software propietario puede ofrecer características avanzadas, soporte técnico especializado y puede ser mucho más fácil en la hora de trabajar para usuarios no tan especializados en la hidráulica. Sin embargo, Xie et al. (2019) señalan que la elección entre software de código abierto y propietario puede variar según el contexto y los objetivos del estudio. Algunas organizaciones pueden optar por utilizar una combinación de ambos tipos de software para aprovechar las ventajas de cada uno y mitigar sus limitaciones.

4 Descripción de área de estudio y problemática

4.1 Área de estudio.

El área de estudio de esta investigación está situada en Medellín, Antioquia, Colombia, específicamente en la cuenca Granizal, que es parte del proyecto "Parques del Río Norte" promovido por la Alcaldía de Medellín (Construcción Parques Del Rio Norte - Alcaldía De Medellín, 2022) (ver Figura 1). Medellín, ubicada en la cordillera central del departamento de Antioquia, se encuentra en el valle de Aburrá. En las últimas décadas, la ciudad ha experimentado un notable crecimiento urbano, comercial e industrial, consolidándose como un importante centro económico gracias a su industria, comercio y construcción (García et al., 2015). Este desarrollo se ha facilitado por su estratégica ubicación geográfica, lo que la convierte en la segunda ciudad más importante del país, después de Bogotá.

Medellín no es solo un centro económico, sino también un núcleo de desarrollo social y cultural. Es parte del Área Metropolitana del Valle de Aburrá, que incluye 10 municipios y forma una gran metrópolis, lo cual facilita la integración regional y potencia el desarrollo económico y social de sus habitantes (La Transformación Urbana De Medellín: Un Caso De Estudio, n.d.). Además, Medellín tiene el Aeropuerto Regional Olaya Herrera y está a solo 45 minutos del Aeropuerto Internacional José María Córdova, el segundo aeropuerto más grande de Colombia, mejorando así su conectividad tanto a nivel nacional como internacional.

En el ámbito turístico, Medellín ofrece una amplia gama de atractivos que incluyen desde sitios históricos y culturales, considerados patrimonios de la ciudad, hasta modernos parques y espacios públicos diseñados para la recreación y el esparcimiento. Entre los lugares más destacados se encuentran el Museo de Antioquia, el Jardín Botánico, el Parque Explora y la Plaza Botero (Santos, 2023). Estos sitios no solo son atractivos para los visitantes, sino que también desempeñan un papel crucial en la identidad cultural de los residentes.

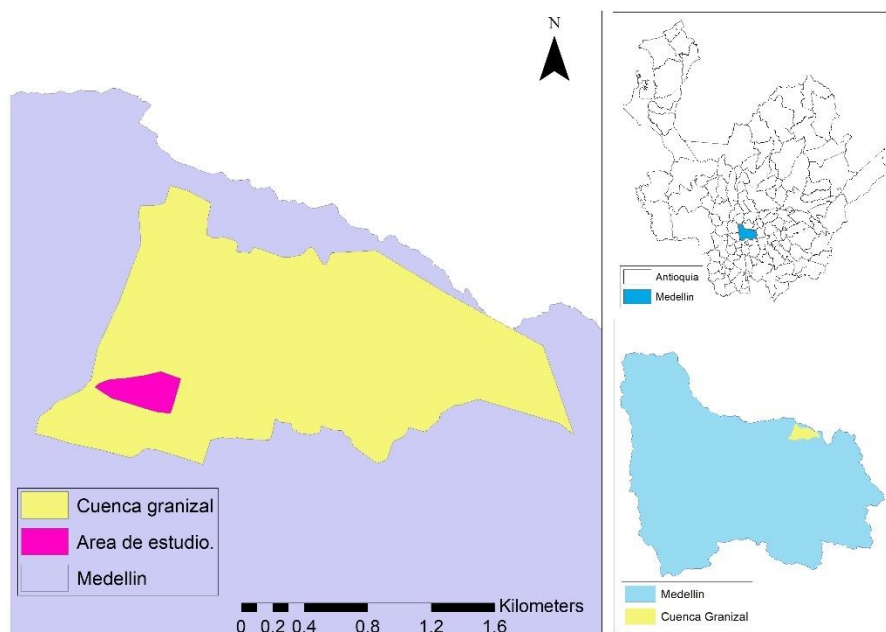
Medellín ha liderado proyectos de urbanismo social que integran a las comunidades menos favorecidas en la vida urbana, creando espacios públicos y mejorando la infraestructura. Proyectos

COMPARACIÓN DE SOFTWARE PROPIETARIO FRENTE A SOLUCIONES DE CÓDIGO ABIERTO PARA LA MODELACIÓN DE SISTEMAS DE ALCANTARILLADO Y DRENAJE URBANO...

como los parques biblioteca, las escaleras eléctricas en barrios difíciles y la revitalización de espacios públicos han mejorado la calidad de vida de los habitantes y fomentado un sentido de pertenencia y unidad social (Nataly, n.d.)

El proyecto "Parques del Río Norte" en Medellín busca mejorar la calidad de vida y la sostenibilidad urbana mediante la recuperación de la ribera del río Medellín (Arango, 2022). Este esfuerzo incluye la creación de áreas verdes y espacios recreativos que conecten distintas zonas de la ciudad. La selección de la cuenca Granizal para este proyecto es significativa dentro del plan urbano y ambiental de la ciudad debido a su importancia. Medellín, con su rica historia, cultura vibrante y avances en infraestructura, proporciona un contexto ideal para estudios en urbanismo y medio ambiente. Proyectos como "Parques del Río Norte" reflejan el compromiso de la ciudad con el desarrollo sostenible y la equidad, atrayendo atención tanto nacional como internacional (Arango, 2022).

Figura 1. Localización del área de estudio.



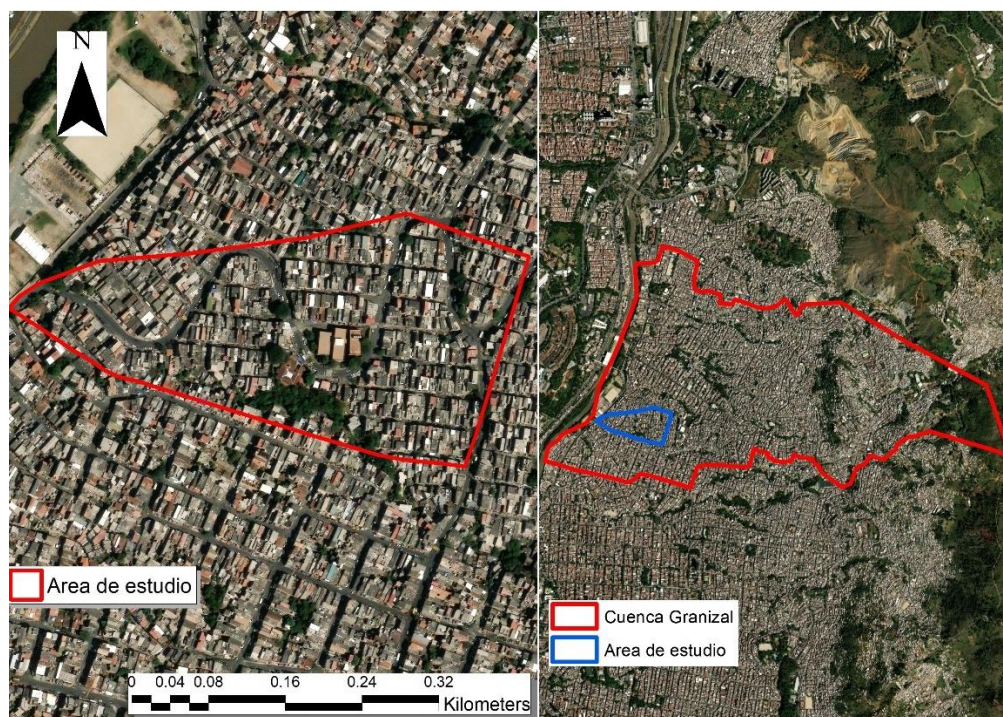
Adicionalmente, se seleccionó un área específica de estudio dentro de la cuenca Granizal (ver Figura 2) debido a varios factores clave. En primer lugar, su proximidad a la zona de influencia

COMPARACIÓN DE SOFTWARE PROPIETARIO FRENTE A SOLUCIONES DE CÓDIGO ABIERTO PARA LA MODELACIÓN DE SISTEMAS DE ALCANTARILLADO Y DRENAJE URBANO...

del proyecto "Parques del Río Norte" facilita la integración de datos relevantes y permite una mejor delimitación del sector, optimizando su uso y asegurando resultados más precisos en la modelación. Es crucial tener en cuenta que este sector se seleccionó también por su alta pendiente, lo cual es significativo para estudiar la dinámica hídrica y el manejo de aguas pluviales. La inclinación del terreno influye directamente en la velocidad y volumen del escurrimiento superficial, factores esenciales para el diseño de soluciones de drenaje efectivas.

Además, el sector contiene una gran cantidad de elementos entre cámaras de inspección y tuberías, lo que añade complejidad al análisis, pero también proporciona una fuente de datos sobre la infraestructura existente. Evaluar esta infraestructura es vital para planificar mejoras y garantizar que las soluciones propuestas sean efectivas y sostenibles.

Otro factor determinante en la selección de este sector es su historial de inundaciones, exacerbadas por su alta impermeabilidad. La impermeabilidad del suelo impide la infiltración del agua, aumentando el escurrimiento superficial y el riesgo de inundaciones. Analizar este sector en detalle permitirá desarrollar estrategias más efectivas para mitigar estos problemas y mejorar la resiliencia de la infraestructura urbana.

Figura 2. Área de estudio dentro de la cuenca granizal.

Nota. *Fuente elaboración propia*

4.2 Inundaciones en el área de estudio.

En la última década llama la atención el aumento considerable en el número de eventos de inundaciones que se viene reportando en el Valle de Aburrá y en particular aquellos eventos presentados en la ciudad de Medellín, lo cual resalta la problemática de la gestión del agua en la región, que es directamente relevante para el proyecto de "Parques del Río Norte" y este trabajo de grado. Las intensas lluvias y las consecuentes inundaciones subrayan la necesidad de un sistema de alcantarillado eficiente y bien planificado. Este proyecto aborda estas preocupaciones mediante la modelación hidrodinámica de los sistemas de alcantarillado en la cuenca Granizal, buscando entender un poco mejor que factores contribuyen al aumento de los eventos de inundaciones, y que este entendimiento permita contribuir a tener una mejor mitigación los efectos de las inundaciones y mejorar la gestión del agua. La recopilación y análisis de datos precisos permiten identificar áreas críticas y desarrollar soluciones sostenibles, como los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS), que pueden ayudar a manejar el exceso de agua y reducir el riesgo de inundaciones.

COMPARACIÓN DE SOFTWARE PROPIETARIO FRENTE A SOLUCIONES DE CÓDIGO ABIERTO PARA LA MODELACIÓN DE SISTEMAS DE ALCANTARILLADO Y DRENAJE URBANO...

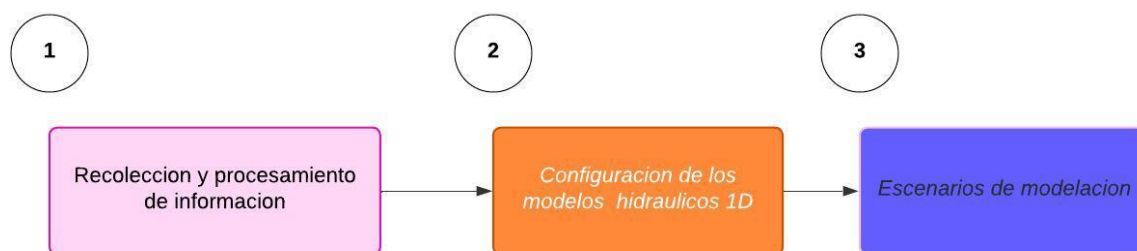
Una de las noticias que sirvió como base fundamental para la investigación en este trabajo de grado fueron las intensas lluvias del 11 de junio de 2021 (Zuluaga, 2021). Este evento específico de precipitación puso de manifiesto la vulnerabilidad de la infraestructura de alcantarillado en la cuenca Granizal y gran parte de la ciudad de Medellín. Las lluvias provocaron severas inundaciones, lo que resaltó la necesidad urgente de un sistema de drenaje más robusto y eficiente.

Las lluvias de esa fecha fueron utilizadas en este estudio debido a su impacto significativo y a la riqueza de datos hidrológicos y topográficos disponibles. Al analizar este evento, fue posible ajustar los modelos hidrodinámicos con cierto grado de precisión, asegurando que las soluciones propuestas sean efectivas y realistas para enfrentar situaciones similares en el futuro. Este enfoque no solo mejora la precisión de la modelación, sino que también proporciona una base sólida para la implementación de soluciones como lo pueden ser los SUDS.

5 Metodología

Para alcanzar los objetivos propuesto para esta investigación se empleo una metodología basada en pasos o etapas, los cuales se ilustran en la siguiente figura. En las cuales se describirá de manera más detallada en esta sección.

Figura 3. Descripción de la metodología a implementar en este trabajo.



5.1 Recolección y procesamiento de información.

Es importante destacar que este trabajo de grado es parte de uno de los componentes del proyecto "Parques del Río Norte", para el cual la Universidad de Antioquia fue contratada. La recolección de datos se realizó utilizando la información proporcionada principalmente por la Alcaldía de Medellín, El SIATA, y las Empresas Públicas de Medellín (EPM). Dentro de la información base recopilada se contó con la geodatabase de la red de alcantarillado pluvial, la red residual y la red combinada de Alcantarillado de EPM, así como información topográfica y datos hidrológicos de la zona de estudio.

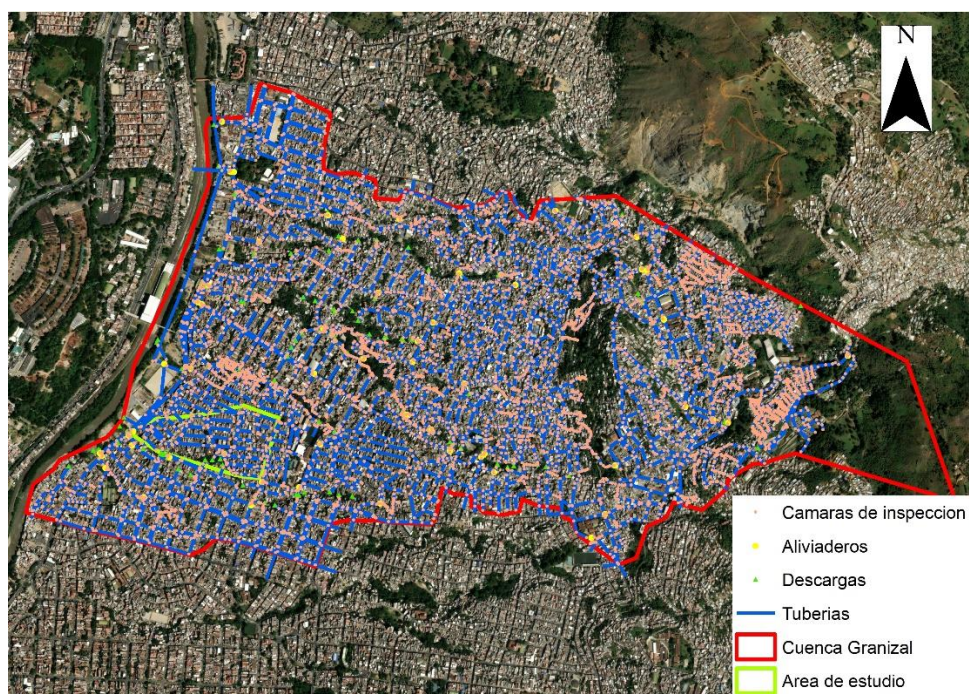
Además, los datos recogidos por los grupos participantes del proyecto fueron utilizados como información primaria para ajustar los modelos hidráulicos de la red. Esta información fue esencial para la selección de parámetros en la configuración y corridas del modelo hidrodinámico, usando datos de lluvias históricas, tipos de uso del suelo, niveles freáticos y condiciones de descarga. Esto permitió obtener un modelo ajustado a las condiciones reales de la zona.

COMPARACIÓN DE SOFTWARE PROPIETARIO FRENTE A SOLUCIONES DE CÓDIGO ABIERTO PARA LA MODELACIÓN DE SISTEMAS DE ALCANTARILLADO Y DRENAJE URBANO...

5.1.1 Geodatabase del sistema de alcantarillado.

La cuenca Granizal cuenta con tres tipos de sistemas de alcantarillado: un sistema para agua lluvia, un sistema residual y un sistema de aguas combinadas. Para este estudio, es crucial considerar el aporte de agua del sistema residual, ya que en ciertas áreas este se conecta con el sistema combinado y su caudal puede ser significativo para la modelación hidrodinámica 1D y su calibración correspondiente. Además, esto permitirá evaluar la calidad del agua en los puntos críticos de la red en términos de inundación y, de este modo, desarrollar soluciones adecuadas para esta área de estudio. En la figura 4 se ilustran los elementos del sistema de alcantarillado de la cuenca granizal.

Figura 4. Sistema de alcantarillado cuenca granizal.



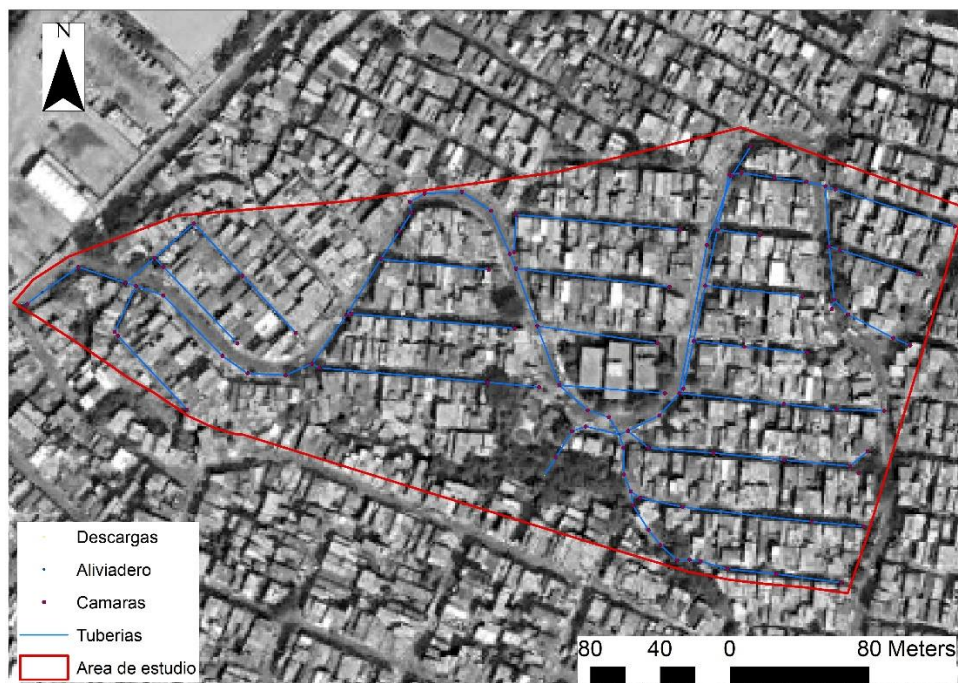
Nota. Fuente elaboración propia

Con base en la información disponible para este proyecto de las redes de alcantarillado, se organizó la información en los siguientes componentes:

COMPARACIÓN DE SOFTWARE PROPIETARIO FRENTE A SOLUCIONES DE CÓDIGO ABIERTO PARA LA MODELACIÓN DE SISTEMAS DE ALCANTARILLADO Y DRENAJE URBANO...

- **Tuberías:** Se incluye información sobre la ubicación en el terreno, como la elevación del punto de inicio y final de la tubería, su tamaño, el material del que está hecha, el tipo de agua que transporta y un identificador único (IPID).
- **Cámaras de inspección:** Se proporciona información sobre la ubicación en el terreno, como la elevación de la base y la tapa de la cámara, el tipo de cámara, su tamaño, el tipo de agua que transporta y un identificador único (IPID).
- **Aliviaderos:** Son estructuras similares a las cámaras de inspección, pero con la capacidad de separar el flujo de agua residual y pluvial en eventos de lluvia. Se incluye información sobre la ubicación en el terreno, como la elevación de la base y la tapa de la cámara, el tipo de cámara, su tamaño, el tipo de aliviadero, la altura del vertedero y un identificador único (IPID).
- **Descargas:** Se proporciona información sobre la ubicación en el terreno de los puntos de descarga y un identificador único (IPID).

Es importante mencionar que para el sitio de estudio seleccionado se realizó una depuración exhaustiva de los datos del sistema de alcantarillado de la cuenca Granizal. Este sistema incluye los siguientes elementos: 101 cámaras de inspección, 105 tuberías, 2 aliviaderos y 2 descargas, los cuales se pueden apreciar en la Figura 5.

Figura 5. Área de estudio con el tramo de alcantarillado.

Nota. Fuente elaboración propia

5.1.2 Problemáticas en recolección de datos.

En la recolección de datos para el proyecto "Parques del Río Norte", utilizando exclusivamente bases de datos existentes, se han identificado varias problemáticas que pueden afectar la precisión y la utilidad de la información recopilada. Primero, la calidad y la actualización de los datos pueden ser una preocupación significativa. Las bases de datos utilizadas pueden no estar actualizadas, lo que lleva a discrepancias entre la información registrada y la situación actual del área de estudio. Esto es especialmente crítico en áreas urbanas dinámicas como Medellín, donde los cambios en la infraestructura y el entorno pueden ser rápidos y frecuentes.

Además, la falta de datos específicos y detallados puede limitar la capacidad de realizar un análisis exhaustivo. Las bases de datos disponibles pueden no contener información suficiente sobre variables clave, como la topografía precisa, la condición actual de las infraestructuras de drenaje, y la distribución exacta de áreas impermeables. Esta falta de detalle puede impedir la

COMPARACIÓN DE SOFTWARE PROPIETARIO FRENTE A SOLUCIONES DE CÓDIGO ABIERTO PARA LA MODELACIÓN DE SISTEMAS DE ALCANTARILLADO Y DRENAJE URBANO...

creación de modelos precisos y la formulación de soluciones efectivas para problemas identificados, como las inundaciones.

Otra problemática es la inconsistencia y heterogeneidad de los datos recopilados de diferentes fuentes. Los datos pueden provenir de diversas instituciones y ser recolectados con diferentes metodologías y estándares, lo que puede generar inconsistencias y dificultades para su integración y análisis conjunto, además de que en diferentes bases de datos existían campos vacíos en los cuales eran datos de importancia para la modelación, algunos de ellos eran la cotas tanto batea y terreno de las cámaras de inspección. Esta heterogeneidad puede complicar la tarea de validar y verificar la exactitud de la información, y también puede requerir un considerable esfuerzo adicional para normalizar y armonizar los datos antes de poder utilizarlos de manera efectiva.

La limitada accesibilidad a datos específicos también es un desafío. Algunas bases de datos pueden estar restringidas por razones de privacidad o seguridad, lo que dificulta el acceso a información crucial para el proyecto. Este problema puede limitar la disponibilidad de datos necesarios para entender completamente las condiciones del área de estudio y desarrollar intervenciones adecuadas.

Finalmente, la dependencia de bases de datos secundarias implica una falta de control sobre el proceso de recolección de datos. No tener la posibilidad de realizar trabajo de campo limita la capacidad de verificar in situ la información y ajustar los datos según las observaciones directas. Esta dependencia puede resultar en una menor precisión de los modelos y las predicciones, ya que se basa completamente en la calidad y precisión de los datos disponibles.

5.1.3 Organización y eliminación de datos

5.1.3.1 Corrección de información faltante

Luego de obtener las bases de datos de las redes de alcantarillado, se procedió a analizar en detalle si dicha información estaba completa para la totalidad de los elementos de la red en el área de estudio o si existían vacíos de información fundamentales para el montaje de los modelos

COMPARACIÓN DE SOFTWARE PROPIETARIO FRENTE A SOLUCIONES DE CÓDIGO ABIERTO PARA LA MODELACIÓN DE SISTEMAS DE ALCANTARILLADO Y DRENAJE URBANO...

hidrodinámicos. El análisis detallado de la información permitió identificar algunos vacíos significativos. Para los elementos tipo nodo, como las cámaras de inspección y aliviaderos, se completó la información topológica necesaria para cada uno de ellos, es decir, sus cotas de batea y terreno, para lo anterior se hizo teniendo en cuenta los siguientes lineamientos:

1. Se aprovechó toda la información proporcionada por el proyecto "Parques del Río Norte", que incluye el sistema de alcantarillado de la cuenca Granizal y los Modelos Digitales de Terreno (DTM) de la cuenca, tanto de elevaciones como de uso de suelo. Esta información fue crucial para determinar las cotas de terreno de algunas cámaras de inspección y aliviaderos que carecían de datos, utilizando la información de los nodos más cercanos.
2. Para los elementos tipo nodo, como las cámaras de inspección y aliviaderos, se completó la información faltante mediante interpolaciones, especialmente cuando se encontraban entre nodos con datos disponibles.
3. Para los elementos tipo tubería, se completó la información utilizando interpolaciones con las cotas de las cámaras de inspección, ya que muchas no contaban con las cotas de arranque y de llegada al siguiente nodo.

Cabe resaltar que esta corrección de información faltante fue esencial para esta investigación, ya que el modelo debe funcionar de manera óptima.

5.1.3.2 Correcciones topológicas.

Una vez completada la información faltante de los elementos del sistema de alcantarillado para la zona de interés, se realizó un análisis de la topología del sistema. Este análisis permitió identificar elementos mal conectados. Entre los errores topológicos encontrados, uno de los más comunes fue que las cotas de batea de las tuberías de entrada o salida a una cámara de inspección estaban por debajo de la cota de batea de la cámara, lo cual no es físicamente posible y necesitaba ser ajustado en la base de datos.

COMPARACIÓN DE SOFTWARE PROPIETARIO FRENTE A SOLUCIONES DE CÓDIGO ABIERTO PARA LA MODELACIÓN DE SISTEMAS DE ALCANTARILLADO Y DRENAJE URBANO...

Para corregir este error topológico, se utilizó la alternativa implicaba ajustar las cotas de batea de las tuberías que llegaban a las cámaras de inspección para que coincidieran con la cota de batea de la cámara a la que estaban conectadas.

Es crucial destacar que un segmento particular del sistema de alcantarillado exhibe un flujo en contrapendiente. Esta condición fue corroborada con los datos del sistema de alcantarillado, este fenómeno de flujo contrapendiente es una característica del sistema de alcantarillado en la cuenca Granizal. Por lo tanto, se decidió mantener este tramo de la red con su comportamiento original para asegurar que el modelo represente fielmente las condiciones reales del sistema actual.

5.1.4 Lluvias de diseño

Para la modelación hidráulica, fue necesario identificar escenarios que causaran inundaciones en Medellín. Se seleccionó el evento de lluvias del 11 de junio de 2021, que provocó inundaciones en nuestra área de estudio. Este evento permitió que el modelo identificara sectores críticos del sistema de alcantarillado, donde el agua en las tuberías se transformaba en escorrentía. Además, se utilizó un hietograma base proporcionado por EPM, proveniente de la estación meteorológica Villa Hermosa, la más cercana a la zona de estudio. Con estos datos, se calculó una tormenta con un período de retorno de 2.33 años, utilizando curvas de frecuencia y duración, parámetros esenciales de las ecuaciones IDF, como se muestra en la siguiente figura.

Es importante destacar la diferencia entre lluvias reales y lluvias ficticias de diseño. Las lluvias reales son eventos medidos directamente por estaciones meteorológicas y reflejan las condiciones climáticas actuales. En cambio, las lluvias de diseño se generan mediante modelos matemáticos que utilizan parámetros históricos y estadísticos para predecir posibles eventos extremos. Estas lluvias de diseño son fundamentales para la planificación y gestión de infraestructuras, ya que permiten prever escenarios críticos y tomar medidas preventivas.

COMPARACIÓN DE SOFTWARE PROPIETARIO FRENTE A SOLUCIONES DE CÓDIGO ABIERTO PARA LA MODELACIÓN DE SISTEMAS DE ALCANTARILLADO Y DRENAJE URBANO...

Figura 6. Parámetros de las curvas IDF en jurisdicción EPM

Curvas de Intensidad, Frecuencia, Duración. Parámetros de las ecuaciones de las curvas IDF			
Estación	C	H	M
Alto San Andrés	1441	12	-0.8419
Ayurá	6992	22	-1.1422
Caldas	6027	21	-1.0948
Chorillos	3528	21	-1.0166
Fabricato	1804	15	-0.8572
La Fé	4510	19	-1.0590
Mazo	11732	34	-1.2191
Miguel de Aguinaga	18485	42	-1.3325
Palmas	6245	27	-1.0919
Planta Villa Hermosa	3899	19	-1.0392
Rionegro La Macarena	2978	19	-0.9913
San Antonio de Prado	2979	14	-0.9537
San Cristóbal	1308	10	-0.7975
Vasconia	3415	12	-0.9805

Fuente: EPM

La cual utiliza la siguiente ecuación:

Ecuación 1

Ecuación de las curvas IDF

$$i \left(\frac{mm}{h} \right) = \frac{C}{(H+T_d(\min))^M} \quad (1)$$

5.1.4.1 Lluvia Real

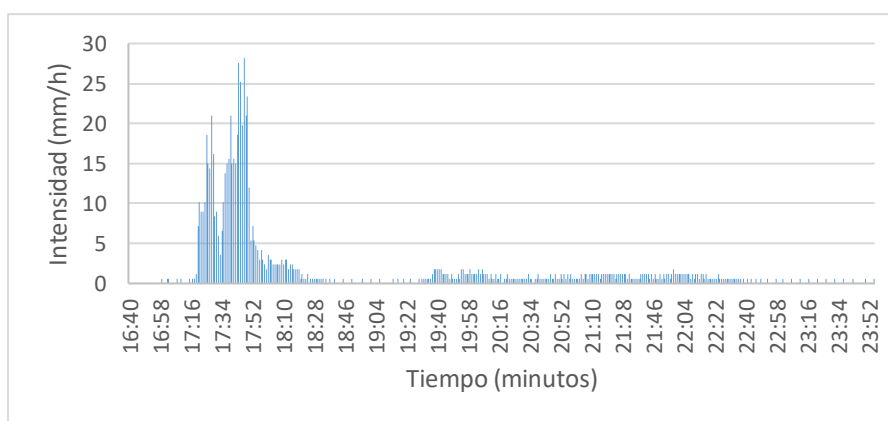
Esta tormenta fue seleccionada porque afectó toda la cuenca del Valle de Aburrá y causó varias emergencias, incluyendo inundaciones y un deslizamiento en la comuna de Enciso que resultó en una víctima fatal (Zuluaga, 2021). La lluvia tuvo una duración de 7 horas y 15 minutos ya que inicio desde las 4:40 pm y termino a las 11:55 pm. Se consideraron datos de tres estaciones pluviométricas pertenecientes al Sistema de Alerta Temprana del Valle de Aburrá (SIATA),

COMPARACIÓN DE SOFTWARE PROPIETARIO FRENTE A SOLUCIONES DE CÓDIGO ABIERTO PARA LA MODELACIÓN DE SISTEMAS DE ALCANTARILLADO Y DRENAJE URBANO...

ubicadas dentro de la cuenca Granizal: Villa del Socorro, Institución Educativa La Candelaria y Villa Niza. Se tomó como referencia la estación Villa Niza, ya que está dentro del área de estudio y proporcionó datos más precisos y de mayor intensidad de las lluvias en esta área.

Esta lluvia, que duró 7 horas y 15 minutos, acumuló más de 756.6 mm en todo ese tiempo. El mayor registro ocurrió a las 5:47 pm, alcanzando una intensidad de 28.2 mm/h, lo cual es considerable para un evento pluvial. En la figura 7 podremos ver la serie de tiempo de esta lluvia.

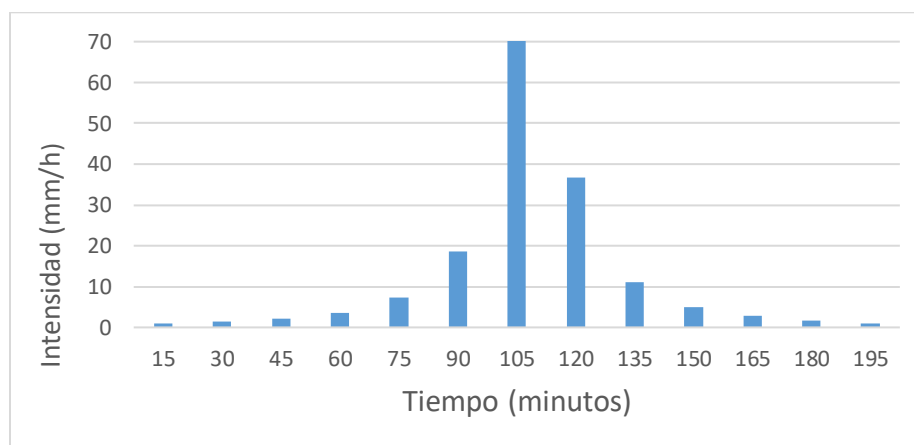
Figura 7. Hietograma lluvia 11 de junio 2021 (mm/h).



Nota. Fuente elaboración propia

5.1.4.2 Lluvia IDF

Para el diseño de este evento de lluvia, se utilizaron los datos proporcionados por la estación meteorológica Villa Hermosa de EPM, ubicada en nuestra zona de estudio. Tal como se ilustra en la Figura 6, estos datos permitieron generar una lluvia siguiendo los parámetros establecidos en las ecuaciones de curvas IDF. Se modeló una lluvia con una duración de 3 horas y un período de retorno de 2.33 años, lo cual resultó suficientemente significativo para suponer una inundación en el área de estudio. La intensidad promedio registrada fue de 191.93 mm/h, con un pico máximo de 98.87 mm/h. Estos valores fueron considerados suficientemente altos para evaluar el colapso de nuestro sistema. En la figura 8 se podrá observar el hietograma de este evento.

Figura 8. Hietograma lluvia de diseño EPM (mm/h).

Nota. *Fuente elaboración propia*

5.1.4.3 Lluvias con cambio climático

En la actualidad con el cambio climático, es prudente incorporar un factor de incremento en la intensidad de las lluvias de diseño. El cambio climático, impulsado principalmente por las emisiones de gases de efecto invernadero, está provocando alteraciones significativas en los patrones meteorológicos a nivel global Observatory (2017). Se espera que estos cambios aumenten tanto la frecuencia como la intensidad de los eventos climáticos extremos, incluyendo lluvias torrenciales y tormentas. Este fenómeno ya se ha observado en diversas regiones, donde los registros históricos muestran una tendencia al alza en la magnitud y la frecuencia de precipitaciones intensas.

Para abordar este desafío, se utiliza un factor de mayorización que ajusta las proyecciones de lluvias de diseño, considerando los posibles efectos del cambio climático. Este factor de mayorización se calcula a partir de modelos climáticos que incorporan datos históricos y proyecciones futuras basadas en diferentes escenarios de emisiones. En este estudio, se aplicó un factor de mayorización del 25.38% ajustando así la intensidad de la lluvias de diseño para reflejar condiciones climáticas futuras más adversas. Con este ajuste, la intensidad promedio de la lluvia

COMPARACIÓN DE SOFTWARE PROPIETARIO FRENTE A SOLUCIONES DE CÓDIGO ABIERTO PARA LA MODELACIÓN DE SISTEMAS DE ALCANTARILLADO Y DRENAJE URBANO...

real se incrementó a 948.63 mm/h y el pico máximo a 35.36 mm/h y para la lluvia de IDF se incrementó a 240.64 mm/h y el pico máximo a 125.22 mm/h

Este enfoque no solo mejora la precisión de las predicciones, sino que también refuerza la importancia de diseñar sistemas de infraestructura resilientes que puedan soportar las crecientes demandas impuestas por el cambio climático. La capacidad de adaptación de estos sistemas es crucial para mitigar los impactos de inundaciones, proteger las comunidades y garantizar la sostenibilidad a largo plazo. En consecuencia, la inclusión de factores de mayorización en el diseño de lluvias es una práctica esencial para la planificación urbana y la gestión de recursos hídricos en el contexto de un clima cambiante.

5.2 Configuración de los modelos hidráulicos 1D

Para llevar a cabo la investigación, se trabajó con dos softwares: EPA-SWMM, desarrollado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA) (Storm Water Management Model (SWMM) | US EPA, 2024), y OpenFlows SewerGEMS, desarrollado por Bentley (Chintana, 2024). El uso de estos programas nos permitió evaluar y comparar diversos aspectos importantes, como el desempeño, la funcionalidad y la facilidad de uso del software propietario frente a las soluciones de código abierto.

EPA-SWMM es una herramienta de código abierto ampliamente utilizada para la modelación de sistemas de alcantarillado y drenaje urbano. Es conocido por su flexibilidad y capacidad para simular el flujo hidráulico y la calidad del agua en sistemas de alcantarillado pluvial y combinado. Su uso en esta investigación permitió aprovechar la transparencia y la comunidad de usuarios que constantemente mejoran y actualizan el software.

Por otro lado, OpenFlows SewerGEMS, un software propietario desarrollado por Bentley, ofrece una plataforma robusta con diversas funcionalidades avanzadas para la modelación hidráulica y la gestión de aguas residuales y pluviales. Este software es reconocido por su interfaz intuitiva y sus herramientas integradas que facilitan el análisis y diseño de sistemas complejos. Al utilizar SewerGEMS, se pudo evaluar cómo un software propietario puede ofrecer soluciones integrales y soporte técnico especializado.

COMPARACIÓN DE SOFTWARE PROPIETARIO FRENTE A SOLUCIONES DE CÓDIGO ABIERTO PARA LA MODELACIÓN DE SISTEMAS DE ALCANTARILLADO Y DRENAJE URBANO...

Cabe destacar que para los programas de Bentley se utilizó una licencia educativa proporcionada por la Universidad de Antioquia. Esta licencia permitió el acceso a todas las funcionalidades del software, aunque con ciertas limitaciones de escala que se deben considerar al realizar modelaciones más extensas o complejas. Estas limitaciones fueron tenidas en cuenta durante el desarrollo de la investigación para asegurar la validez y aplicabilidad de los resultados obtenidos.

5.2.1 Configuración de los modelos 1D

En los softwares seleccionados, la configuración de los modelos unidimensionales (1D) consiste en definir individualmente cada uno de los módulos disponibles en el programa, los cuales son partes esenciales de los modelos lluvia-escorrentía. Estos módulos incluyen los siguientes componentes:

1. **Precipitación:** Se configura el tipo de precipitación, su duración e intensidad, basándose en datos históricos o de diseño. Es crucial definir correctamente estos parámetros para obtener resultados precisos en la simulación de escorrentía.
2. **Cuencas Hidrográficas:** Se definen las características físicas de las cuencas, incluyendo su área, pendiente, tipo de suelo y uso del suelo. Estos factores influyen en la cantidad de escorrentía generada durante un evento de lluvia.
3. **Conductos y Canales:** Se especifican las propiedades de los conductos y canales que transportan el agua a través del sistema de alcantarillado o drenaje. Esto incluye su geometría, rugosidad y capacidad de transporte.
4. **Salida y Descarga:** Se establecen los puntos de salida y descarga del sistema, donde el agua es finalmente liberada al medio ambiente o a otras estructuras de manejo de agua.
5. **Calibración y Validación:** Se lleva a cabo la calibración y validación del modelo utilizando datos observados para asegurar que el modelo simula con precisión los eventos de lluvia-escorrentía. Esto implica ajustar parámetros y verificar los resultados del modelo contra datos reales.

Estos módulos son configurados individualmente en los programas EPA-SWMM y OpenFlows SewerGEMS, asegurando que cada componente del sistema de drenaje sea

COMPARACIÓN DE SOFTWARE PROPIETARIO FRENTE A SOLUCIONES DE CÓDIGO ABIERTO PARA LA MODELACIÓN DE SISTEMAS DE ALCANTARILLADO Y DRENAJE URBANO...

representado con precisión. La correcta configuración y combinación de estos módulos permiten la simulación efectiva de eventos de lluvia-escorrentía y la evaluación de posibles inundaciones y su impacto en el área de estudio.

5.2.1.1 Modelo Hidráulico EPA-SWMM

EPA-SWMM es un modelo dinámico de simulación de lluvia y escorrentía que se utiliza para la simulación de un solo evento o a largo plazo (continua) de la cantidad y calidad de la escorrentía en áreas principalmente urbanas. El componente de escorrentía de SWMM opera en un conjunto de áreas de subcuencas que reciben precipitación y generan escorrentía y cargas contaminantes. La parte de ruta de SWMM transporta esta escorrentía a través de un sistema de tuberías, canales, dispositivos de almacenamiento/tratamiento, bombas y reguladores.

SWMM rastrea la cantidad y calidad de la escorrentía generada dentro de cada subcuenca, así como el caudal, la profundidad del flujo y la calidad del agua en cada tubería y canal durante un período de simulación compuesto de múltiples pasos de tiempo. Este modelo de gestión de agua de tormenta es utilizado a nivel mundial para la planificación, el análisis y el diseño relacionados con la escorrentía de aguas pluviales, alcantarillas combinadas y sanitarias, y otros sistemas de drenaje. Además, puede ser empleado para evaluar estrategias de control de aguas pluviales de infraestructura gris, como tuberías y desagües pluviales, así como para desarrollar soluciones de control de aguas pluviales híbridas verdes/grises rentables.

Desarrollado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA), SWMM fue creado para apoyar los objetivos locales, estatales y nacionales de gestión de aguas pluviales (Storm Water Management Model (SWMM) | US EPA, 2024). Su propósito es reducir la escorrentía mediante la infiltración y retención, así como disminuir las descargas que provocan el deterioro de los cuerpos de agua. Gracias a su capacidad para simular tanto la cantidad como la calidad de la escorrentía, SWMM se ha convertido en una herramienta esencial para ingenieros y planificadores en la gestión sostenible de los recursos hídricos urbanos.

El motor de cálculo de EPA-SWMM se basa en la resolución de ecuaciones diferenciales parciales que describen el flujo no permanente (unsteady flow) en sistemas de drenaje. Estas

COMPARACIÓN DE SOFTWARE PROPIETARIO FRENTE A SOLUCIONES DE CÓDIGO ABIERTO PARA LA MODELACIÓN DE SISTEMAS DE ALCANTARILLADO Y DRENAJE URBANO...

ecuaciones son conocidas como las ecuaciones de Saint-Venant (EPA, 2022), que consisten en un conjunto de ecuaciones que modelan la conservación de masa y la conservación de cantidad de movimiento. Las ecuaciones de Saint-Venant, también llamadas ecuaciones de flujo completamente dinámico, son esenciales para simular con precisión el comportamiento hidráulico en sistemas de alcantarillado y drenaje urbano, este motor de cálculo también es conocido como método explícito.

Red definida

Después de hacer la depuración de elementos y datos, la red dentro de nuestra área de estudio, estos datos se ingresaron manualmente a EPA-SWMM, ya que no era permitidos importarse directamente desde algún otro software, para este caso de estudio solo se tuvieron en consideración las cámaras de inspección, los aliviaderos, tuberías y descargas ya que esto es lo que nos interesa dentro del área de estudio, se podrá observar en la siguiente figura

Figura 9. Red final del área de estudio.



Nota. Fuente elaboración propia

COMPARACIÓN DE SOFTWARE PROPIETARIO FRENTE A SOLUCIONES DE CÓDIGO ABIERTO PARA LA MODELACIÓN DE SISTEMAS DE ALCANTARILLADO Y DRENAJE URBANO...

A continuación, se describirán en mayor profundidad cada uno de los atributos considerados en el sistema de alcantarillado y su proceso de consolidación de información dentro del software:

- **Cámaras de inspección (Junctions):** Las cámaras de inspección son nodos esenciales que conectan el sistema de drenaje, incluyendo las tuberías. Estas cámaras, también conocidas como pozos de inspección o "manholes", sirven como puntos de conexión entre las tuberías. Los aportes externos ingresan al sistema de drenaje a través de estas conexiones. En situaciones donde hay un exceso de agua, se puede generar un flujo presurizado dentro del sistema. Este exceso de agua puede perderse en el sistema y convertirse en escorrentía superficial, o simplemente estancarse y eventualmente regresar al sistema. Este fenómeno es lo que comúnmente se conoce como inundación.

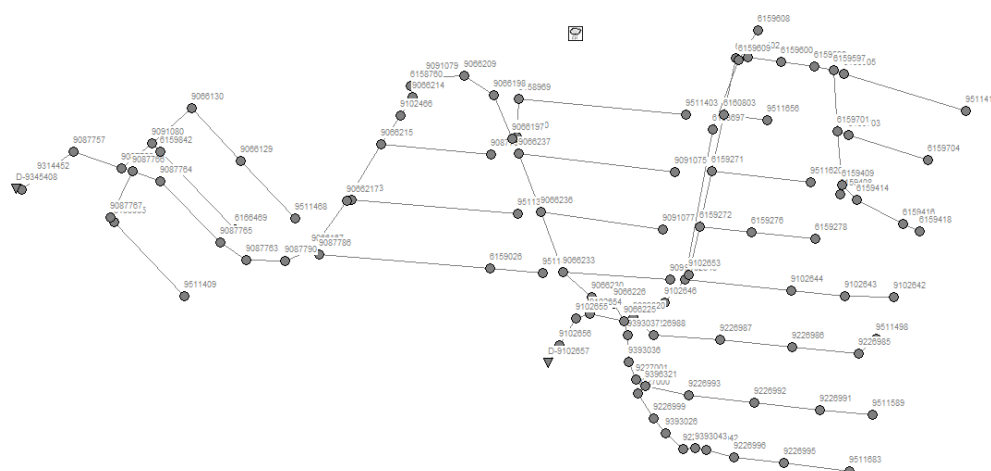
Para integrar esta información dentro de EPA-SWMM, se consideró el ID, que es el identificador único de la cámara de inspección, el cual en el programa se denomina "Junctions". Luego, se registró la elevación de la cota de tapa y la altura dentro de la cámara de inspección, que corresponde a la diferencia entre la cota de tapa y la cota de batea. Además, se tuvieron en cuenta las coordenadas X y Y del nodo para establecer su ubicación dentro del programa.

Figura 10. Datos del elemento tipo cámara en EPA-SWMM

Project Data						
Data Category	Name	Elevation	MaxDepth	InitDepth	SurDepth	Aponded
[TITLE]	6160005	1449.36	1.83	0	0	0
[OPTIONS]	9091080	1449.25	2.45	0	0	0
[EVAPORATION]	9087756	1444.75	2.97	0	0	0
[RAINGAGES]	9087757	1441.15	2.32	0	0	0
[SUBCATCHMENTS]	9087767	1449.22	1.83	0	0	0
[SUBAREAS]	9087766	1446.05	2.57	0	0	0
[INFILTRATION]	9314450	1440.24	2.56	0	0	0
[JUNCTIONS]	9087792	1475.89	1.21	0	0	0
[OUTFALLS]	6158970	1477.43	2.48	0	0	0
[CONDUITS]	9511399	1476.72	2.68	0	0	0
[XSECTIONS]	6158969	1480.93	2.96	0	0	0
[DWF]	6158943	1465.38	1.73	0	0	0
[TIMESERIES]	9511409	1455.57	0.92	0	0	0
[PATTERNS]	6159026	1479.55	2.46	0	0	0
[REPORT]	6166469	1455.94	2.06	0	0	0

COMPARACIÓN DE SOFTWARE PROPIETARIO FRENTE A SOLUCIONES DE CÓDIGO ABIERTO PARA LA MODELACIÓN DE SISTEMAS DE ALCANTARILLADO Y DRENAJE URBANO...

Figura 11. Cámaras de inspección en EPA-SWMM



- Descargas (Outfalls):** Las descargas son los nodos terminales del sistema de drenaje, responsables de definir las condiciones finales del sistema aguas abajo. Son cruciales para el correcto modelado del flujo de salida del sistema, ya que determinan cómo y dónde el agua abandona el sistema de drenaje. Para integrar la información de las descargas en EPA-SWMM, se siguió un procedimiento similar al utilizado para las cámaras de inspección, dado que comparten varios pasos comunes., ya que cumplen los mismos pasos, se tubo como referencia el ID que es el identificador único además de esto para distinguirlos de las demás cámaras de inspección se añadió una D al frente en ambas descargas, ya que solo se cuenta con 2, se ingresó la información de la cota batea o fondo y el tipo de flujo que para ambos era libre, además se ubicaron con coordenadas X y Y.

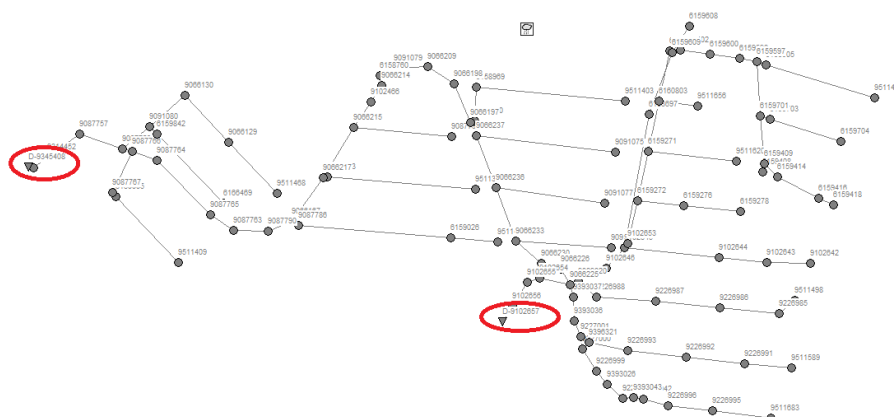
COMPARACIÓN DE SOFTWARE PROPIETARIO FRENTE A SOLUCIONES DE CÓDIGO ABIERTO PARA LA MODELACIÓN DE SISTEMAS DE ALCANTARILLADO Y DRENAJE URBANO...

Figura 12. Datos del elemento tipo descarga en EPA-SWMM

Project Data						
Data Category	Name	Elevation	Type	Stage Data	Gated	Route To
[TITLE]	D-9345408	1437.65	FREE		NO	
[OPTIONS]	D-9102657	1475.68	FREE		NO	
[EVAPORATION]						
[RAINGAGES]						
[SUBCATCHMENTS]						
[SUBAREAS]						
[INFILTRATION]						
[JUNCTIONS]						
[OUTFALLS]						
[CONDUITS]						
[XSECTIONS]						
[DWF]						
[TIMESERIES]						
[PATTERNS]						
[REPORT]						

En la siguiente figura se mostrarán las descargas las cuales estarán señaladas por un círculo rojo.

Figura 13. Descargas en EPA-SWMM



- **Tuberías (Conduits):** Las tuberías son los conductos por los cuales se desplaza el agua desde un nodo a otro del sistema, es posible selección la sección transversal con las distintas variedades de geometrías que nos arroja el programa.

COMPARACIÓN DE SOFTWARE PROPIETARIO FRENTE A SOLUCIONES DE CÓDIGO ABIERTO PARA LA MODELACIÓN DE SISTEMAS DE ALCANTARILLADO Y DRENAJE URBANO...

SWMM emplea la ecuaciones de Manning para establecer la relaciones entre el caudal que circula por el conducto (Q) , la sección del mismo (A) , radio (R_h) ,y la pendiente (S). La cual se utiliza la siguiente ecuación:

Ecuación 2 –

Ecuación de Manning

$$Q = \frac{1}{n} A R_h^{2/3} \sqrt{S}$$

Donde n es el coeficiente de rugosidad de Manning, para nuestro caso de estudio se utilizo el modelo de la Onda Dinamica (Dynamic Wave) que se interpreta como la pendiente hidráulica del flujo (es decir, la perdida por unidad de longitud) (EPA,2022).

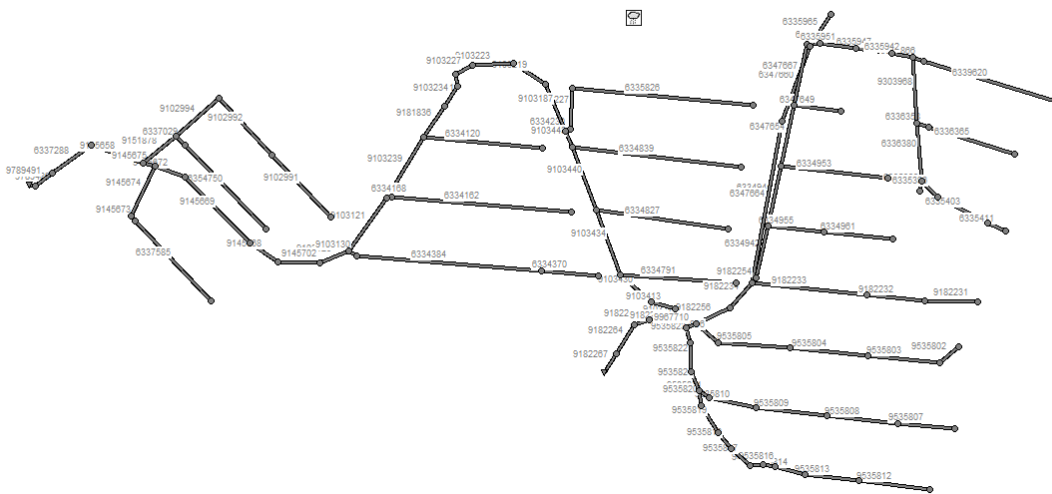
Para integrar los datos de las tuberías en EPA-SWMM, se tomó en cuenta el ID, que actúa como el registro único de cada tubería. Para los nodos de salida de cada tubería (From Node), se ingresó el ID de cada cámara de inspección de origen, y de la misma manera se hizo para las cámaras de inspección de llegada (To Node). Además, se ingresó la longitud de cada tubería y la rugosidad de cada una, parámetros esenciales para las simulaciones hidráulicas precisas. Por último, se consideró la altura a la que cada tubería llega a la cámara de inspección de llegada, asegurando una representación precisa del perfil hidráulico.

COMPARACIÓN DE SOFTWARE PROPIETARIO FRENTE A SOLUCIONES DE CÓDIGO ABIERTO PARA LA MODELACIÓN DE SISTEMAS DE ALCANTARILLADO Y DRENAJE URBANO...

Figura 14. Datos del elemento tipo tuberías en EPA-SWMM

Project Data									
Data Category	Name	From Node	To Node	Length	Roughness	InOffset	OutOffset	InitFlow	MaxFlow
[TITLE]	6334839	9091075	9066237	88.36	0.015	0	0.27	0	0
[OPTIONS]	6335826	9511403	6158969	94.39	0.015	0	0.51	0	0
[EVAPORATION]	6334827	9091077	9066236	69.45	0.015	0	0.09	0	0
[RAINGAGES]	6337585	9511409	6160005	56.58	0.015	0	0.1	0	0
[SUBCAUCHMENTS]	9145672	9087764	9087766	15.41	0.009	0	0.14	0	0
[SUBAREAS]	6337288	9087757	9314452	23.58	0.013	0	0.43	0	0
[INFILTRATION]	9145658	9087756	9087757	27.12	0.009	0	0.15	0	0
[JUNCTIONS]	9145673	6160005	9087767	4	0.015	0	0.07	0	0
[OUTFALLS]	9145674	9087767	9087766	27.63	0.015	0	0.55	0	0
[CONDUITS]	9145675	9087766	9087756	5.02	0.015	0	0.36	0	0
[XSECTIONS]	9151878	9091080	9087756	20.88	0.015	0	0.38	0	0
[DWF]	9789489	9314450	D-9345408	4	0.009	0	0	0	0
[TIMESERIES]	9789491	9314452	9314450	9.33	0.009	0	0	0	0
[PATTERNS]	6334162	9511399	6158943	92.64	0.009	0	0.1	0	0
[REPORT]	6334384	6159026	9087786	96.54	0.015	0	0.14	0	0

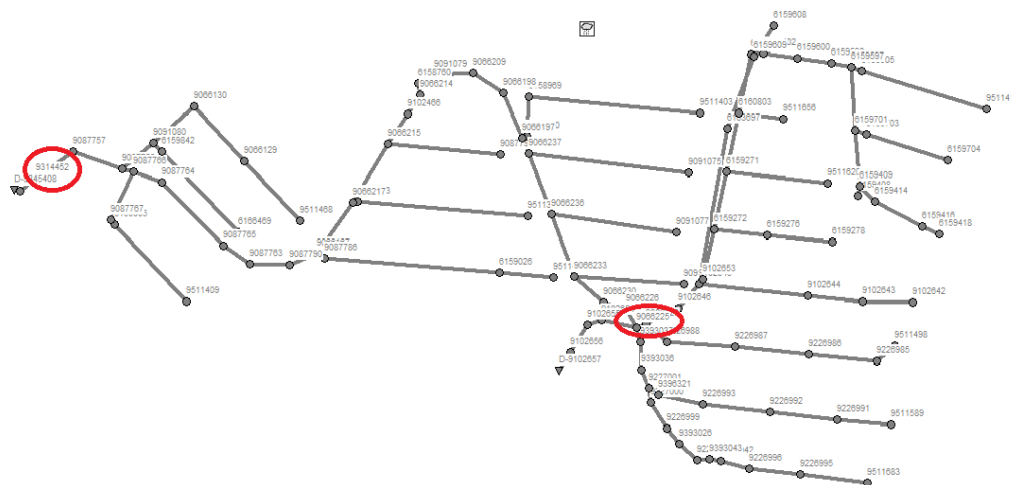
Figura 15. Tuberías en EPA-SWMM Con su identificador único.



- Aliviaderos:** Los aliviaderos son dispositivos de control de flujo utilizados para desviar el exceso de agua cuando la capacidad de los conductos principales es superada, evitando así inundaciones y daños en el sistema de drenaje urbano, para nuestro caso de estudio se ingresaron como nodos de inspección, lo cual tienen el mismo paso a paso para ingresar los datos. Estos aliviaderos estarán dentro de un círculo rojo en la figura 16.

COMPARACIÓN DE SOFTWARE PROPIETARIO FRENTE A SOLUCIONES DE CÓDIGO ABIERTO PARA LA MODELACIÓN DE SISTEMAS DE ALCANTARILLADO Y DRENAJE URBANO...

Figura 16. Aliviaderos en EPA-SWMM con su identificador único.



- **Pluviómetros (Rain Gages):** Los pluviómetros (Rain gages) suministran los datos de entrada de las precipitaciones que ocurren sobre el área de estudio, los datos de lluvia pueden ser definidos por series temporales.

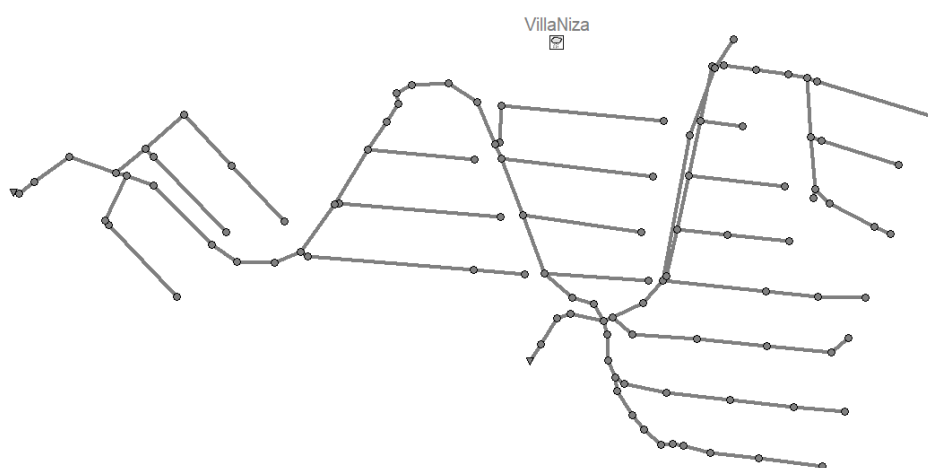
El ingreso de los datos de un pluviómetro es primeramente darle el nombre, en nuestro caso era Villa Niza, luego el formato que era intensidad, el intervalo de tiempo de los datos, y el nombre del origen de los datos de la lluvia, además de esto también tener en cuenta las coordenadas X y Y para su ubicación.

Figura 17. Datos del elemento tipo pluviómetro en EPA-SWMM.

COMPARACIÓN DE SOFTWARE PROPIETARIO FRENTE A SOLUCIONES DE CÓDIGO ABIERTO PARA LA MODELACIÓN DE SISTEMAS DE ALCANTARILLADO Y DRENAJE URBANO...

Project Data				
Data Category	Name	Format	Interval SCF	Source
[TITLE]	VillaNiza	INTENSITY 0:01	1.0	TIMESERIES Lluvia-11-Junio-2021
[OPTIONS]				
[EVAPORATION]				
[RAINGAGES]				
[SUBCATCHMENTS]				
[SUBAREAS]				
[INFILTRATION]				
[JUNCTIONS]				
[OUTFALLS]				
[CONDUITS]				
[XSECTIONS]				
[DWF]				
[TIMESERIES]				
[PATTERNS]				
[REPORT]				

Figura 18. Pluviómetro en EPA-SWMM con su identificador único.

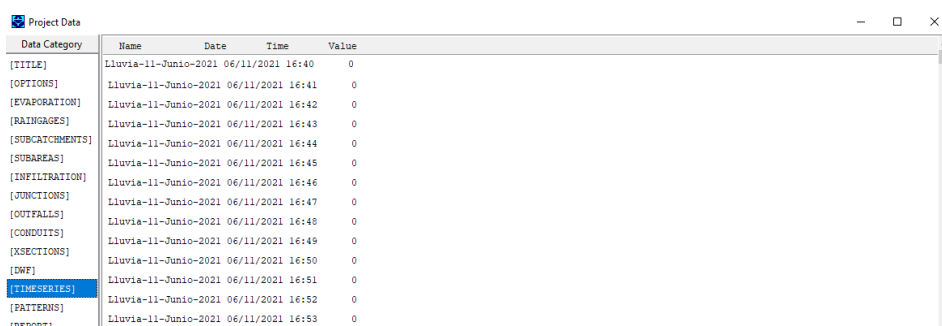


Además de esto las lluvias se ingresan en forma de series temporales (Time Series). En EPA-SWMM, las series temporales (time series) registran variaciones en parámetros como precipitación, flujo de entrada, y niveles de agua a intervalos definidos. Estas series se asocian con elementos del modelo y se utilizan para simular dinámicamente el comportamiento del sistema de drenaje urbano, permitiendo evaluar respuestas a eventos de lluvia y diseñar sistemas de control de flujo. Son esenciales para obtener simulaciones precisas y realistas al capturar la variabilidad temporal de los fenómenos hidrológicos e hidráulicos.

COMPARACIÓN DE SOFTWARE PROPIETARIO FRENTE A SOLUCIONES DE CÓDIGO ABIERTO PARA LA MODELACIÓN DE SISTEMAS DE ALCANTARILLADO Y DRENAJE URBANO...

Para ingresar una serie de tiempo se utilizó, una lluvia con su nombre, la fecha y hora además de esto la intensidad en mm/h con la cual ocurrió el evento.

Figura 19. Serie temporal con sus datos de ingreso en EPA-SWMM.



Data Category	Name	Date	Time	Value
[TITLE]	Lluvia-11-Junio-2021	06/11/2021	16:40	0
[OPTIONS]	Lluvia-11-Junio-2021	06/11/2021	16:41	0
[EVAPORATION]	Lluvia-11-Junio-2021	06/11/2021	16:42	0
[RAINGAGES]	Lluvia-11-Junio-2021	06/11/2021	16:43	0
[SUBCATCHMENTS]	Lluvia-11-Junio-2021	06/11/2021	16:44	0
[SUBAREAS]	Lluvia-11-Junio-2021	06/11/2021	16:45	0
[INFILTRATION]	Lluvia-11-Junio-2021	06/11/2021	16:46	0
[JUNCTIONS]	Lluvia-11-Junio-2021	06/11/2021	16:47	0
[OUTFALLS]	Lluvia-11-Junio-2021	06/11/2021	16:48	0
[CONDUITS]	Lluvia-11-Junio-2021	06/11/2021	16:49	0
[XSECTIONS]	Lluvia-11-Junio-2021	06/11/2021	16:50	0
[DWF]	Lluvia-11-Junio-2021	06/11/2021	16:51	0
[TIMESERIES]	Lluvia-11-Junio-2021	06/11/2021	16:52	0
[PATTERNS]	Lluvia-11-Junio-2021	06/11/2021	16:53	0
[REPORT]	Lluvia-11-Junio-2021	06/11/2021	16:53	0

- **Subcuencas (Subcatchments):** Las subcuencas en EPA-SWMM representan áreas dentro de una cuenca mayor donde el agua de lluvia se recoge y se convierte en escorrentía superficial, infiltración y otros flujos hidrológicos. La definición precisa de subcuencas es fundamental para modelar con precisión el comportamiento hidrológico de una cuenca urbana.

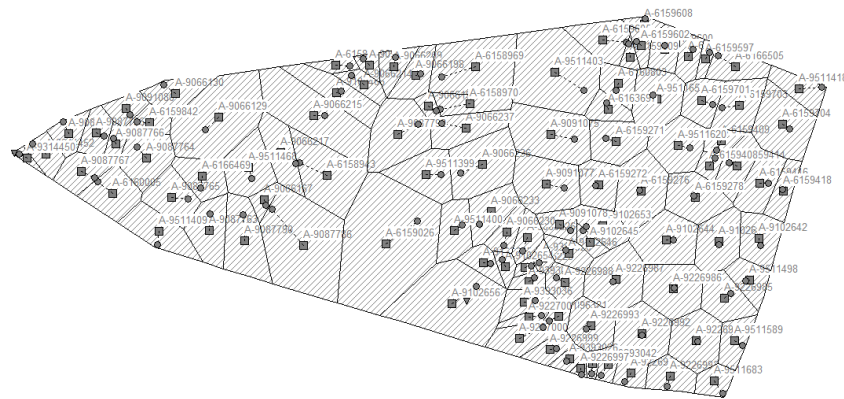
Para la creación de estas subcuencas, se definieron puntos con coordenadas X y Y, que al unirse formaron polígonos representando cada subcuenca. A cada una se le asignó un nombre distintivo comenzando con una "A" seguido del ID de la cámara de inspección que tributaba dentro del nodo correspondiente. Además, se asociaron a un pluviómetro y al nodo de destino, y se ingresaron valores como el área (calculada en ArcMap), el porcentaje de impermeabilidad (derivado del uso del suelo de la zona de estudio), el ancho de la cuenca (importante para determinar la cantidad de escorrentía que llega a la cámara de inspección) y su porcentaje de pendiente. Todos estos datos se ingresaron manualmente para crear las subcuencas dentro del programa.

COMPARACIÓN DE SOFTWARE PROPIETARIO FRENTE A SOLUCIONES DE CÓDIGO ABIERTO PARA LA MODELACIÓN DE SISTEMAS DE ALCANTARILLADO Y DRENAJE URBANO...

Figura 20. Datos del elemento tipo pluviómetro en EPA-SWMM

Project Data									
Data Category	Name	Rain Gage	Outlet	Area	%Imperv	Width	%Slope	CurbLen	SnowPack
[TITLE]	A-9314452	VillaNiza	9314452	0.045201228	86.9	25.7	17.74	0	
[OPTIONS]	A-9226985	VillaNiza	9226985	0.083278051	89.7	28.54	26.47	0	
[EVAPORATION]	A-9087757	VillaNiza	9087757	0.044918423	90.2	24.52	18.04	0	
[RAINGAGES]	A-9087756	VillaNiza	9087756	0.051766512	86.1	30.09	18.18	0	
[SUBCATCHMENTS]	A-9091080	VillaNiza	9091080	0.039085163	85.4	27.83	18.33	0	
[SUBAREAS]	A-6160005	VillaNiza	6160005	0.088255495	99.5	29.84	14.07	0	
[INFILTRATION]	A-9511498	VillaNiza	9511498	0.055732658	75.9	34.38	33.37	0	
[JUNCTIONS]	A-9102644	VillaNiza	9102644	0.2421758287	97.7	35.97	23.56	0	
[OUTFALLS]	A-9102643	VillaNiza	9102643	0.2401965604	98.2	37.98	26.8	0	
[CONDUITS]	A-9102642	VillaNiza	9102642	0.082746785	89.8	32.46	29.55	0	
[XSECTIONS]	A-6160803	VillaNiza	6160803	0.052488727	95.9	23.68	20.31	0	
[DWF]	A-6159416	VillaNiza	6159416	0.083022241	89.8	43.33	22.78	0	
[TIMESERIES]	A-6159276	VillaNiza	6159276	0.2435361188	97.3	52.79	27.38	0	
[PATTERNS]	A-6159414	VillaNiza	6159414	0.071301384	92.5	40.97	23.4	0	
[REPORT]	A-6159409	VillaNiza	6159409	0.035411407	65.9	21.99	20.55	0	

Figura 21. Subcategorías en EPA-SWMM con su identificador único.



- Caudal agua residual (DWF)** : Para calcular esta información, se utilizó una tabla de EPM que contiene el método de mayoración de Tchobanoglous. Esta tabla proporciona una ecuación con información crucial que, al realizar los cálculos correspondientes, permite determinar el consumo en nuestra área de estudio, proporcionando así un aproximado del caudal residual doméstico. Para este cálculo, se considero esta ecuación y los siguientes parámetros:

COMPARACIÓN DE SOFTWARE PROPIETARIO FRENTE A SOLUCIONES DE CÓDIGO ABIERTO PARA LA MODELACIÓN DE SISTEMAS DE ALCANTARILLADO Y DRENAJE URBANO...

Ecuación 3

Método factor de mayoración Tchobanoglous

$$Q_D = C_R * D_{NETA_P} * (1 + IANC) * A$$

Q_D : Caudal de aguas residuales domesticas (L/s)

C_R : Coeficiente de retorno (adimensional), este coeficiente corresponde al 0.85.

IANC= Índice de agua no contabilizada de acuerdo con el circuito de acueducto (decimales), este índice corresponde a 38%.

A: Área tributaria bruta (HA), acá se multiplico por cada una de las áreas de las subcuencas.

Cabe aclarar que en el software se ingresa esto directamente a la cámara de inspección, lo cual su ID, será el único identificador, además de esto se introduce como constituye (Constituent) lo cual para nosotros es tipo flujo y en línea base (Baseline) sería el resultado de la ecuación antes mencionada que se multiplica por cada una de las subcuencas y en los patrones (Patterns) se creó un patrón semanal y uno horario, estos últimos se utilizan para modelar variaciones temporales en datos de entrada específicos, como las tasas de precipitación, las demandas de agua o las tasas de descarga.

Figura 22. Datos de agua residual dentro de EPA-SWMM.

Project Data				
Data Category	Node	Constituent	Baseline	Patterns
[TITLE]	6160005	FLOW	0.04634435	"PatronSemanal" "PatronHorario"
[OPTIONS]	9091080	FLOW	0.020524234	"PatronSemanal" "PatronHorario"
[EVAPORATION]	9087756	FLOW	0.02718341	"PatronSemanal" "PatronHorario"
[RAINGAGES]	9087757	FLOW	0.023587371	"PatronSemanal" "PatronHorario"
[SUBCATCHMENTS]	9087767	FLOW	0.034444516	"PatronSemanal" "PatronHorario"
[SUBAREAS]	9087766	FLOW	0.013956166	"PatronSemanal" "PatronHorario"
[INFILTRATION]	9314450	FLOW	0.005822749	"PatronSemanal" "PatronHorario"
[JUNCTIONS]	9087792	FLOW	0.079886192	"PatronSemanal" "PatronHorario"
[OUTFALLS]	6158970	FLOW	0.031159785	"PatronSemanal" "PatronHorario"
[CONDUITS]	9511399	FLOW	0.05327911	"PatronSemanal" "PatronHorario"
[XSECTIONS]	6158969	FLOW	0.103463011	"PatronSemanal" "PatronHorario"
[DWF]	6158943	FLOW	0.085940163	"PatronSemanal" "PatronHorario"
[TIMESERIES]	9511409	FLOW	0.049249966	"PatronSemanal" "PatronHorario"
[PATTERNS]	6159026	FLOW	0.240076905	"PatronSemanal" "PatronHorario"
[REPORT]	6166469	FLOW	0.038342865	"PatronSemanal" "PatronHorario"

5.2.1.2 Modelo Hidráulico SewerGEMS.

SewerGEMS es un software desarrollado por Bentley Systems, una empresa líder en soluciones de software para infraestructura. Esta herramienta está IDF para la modelación y análisis de sistemas de alcantarillado sanitario y pluvial. OpenFlows SewerGEMS facilita la creación de diseños óptimos para la planificación de alcantarillado urbano y el análisis de reparaciones de desbordamientos en un entorno intuitivo. Permite diseñar y operar redes de alcantarillado sanitario o de transporte combinado utilizando capacidades hidráulicas e hidrológicas avanzadas, que incluyen diversos métodos de cálculo para condiciones de clima seco y húmedo Chintana (2024). Con la nueva capacidad de análisis hidráulico 1D/2D, es posible comprender mejor la profundidad y velocidad de las inundaciones superficiales, los peligros asociados y los tiempos de inundación.

Bentley Systems ha creado una serie de programas para la gestión y diseño de infraestructura civil, incluyendo SewerGEMS, que ayuda a ingenieros y planificadores a diseñar, modelar y optimizar redes de alcantarillado de manera eficiente.

Este programa modela con dos motores de cálculo los cuales son el método explícito que es el mismo motor de EPA-SWMM y el motor implícito resuelve las ecuaciones del motor explícito de EPA-SWMM simultáneamente para proporcionar una simulación precisa de las condiciones de flujo en sistemas de alcantarillado. La solución implícita es preferida en muchos casos porque es más estable numéricamente y puede manejar condiciones de flujo complejo y transitorios hidráulicos de manera eficiente. Este enfoque permite a SewerGEMS realizar análisis detallados y confiables de redes de alcantarillado, ayudando a ingenieros y planificadores a diseñar y operar estas infraestructuras críticas de manera efectiva.

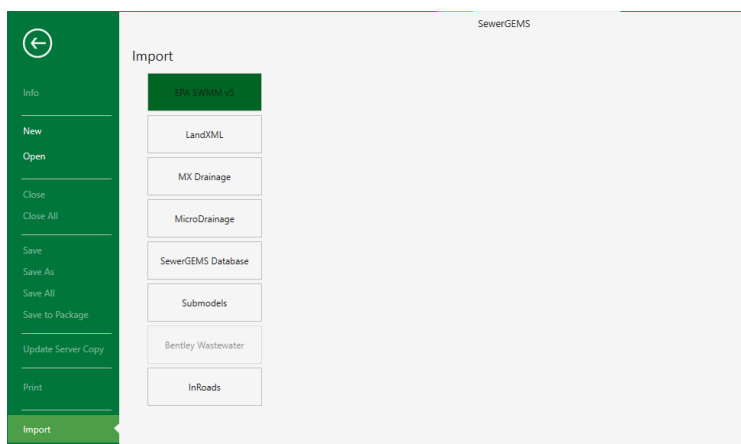
Importación y Red definida

Una vez depurada la red de los elementos constituyentes del sistema de drenaje para el área de estudio, según lo descrito en las secciones anteriores y en formato SWMM, estos pueden ser importados directamente al software SewerGEMS utilizando las funcionalidades propias del

COMPARACIÓN DE SOFTWARE PROPIETARIO FRENTE A SOLUCIONES DE CÓDIGO ABIERTO PARA LA MODELACIÓN DE SISTEMAS DE ALCANTARILLADO Y DRENAJE URBANO...

programa. Aunque una red de drenaje puede tener una infinidad de componentes, para este caso de estudio se consideraron únicamente las cámaras de inspección, las descargas, los aliviaderos y las tuberías, los mismos elementos que se emplearon en EPA-SWMM.

Figura 23. Paso de importación dentro de SewerGEMS del formato EPA-SWMM.



Una vez realizada la importación al software SewerGEMS, se llevó a cabo la verificación de los datos para asegurar que todos los elementos se hayan exportado satisfactoriamente. Tras confirmar la correcta exportación, se aprobó el modelo hidráulico en este software. La figura 20 muestra el resultado final del modelo en SewerGEMS.

Figura 24. Modelo importado en SewerGEMS.

COMPARACIÓN DE SOFTWARE PROPIETARIO FRENTE A SOLUCIONES DE CÓDIGO ABIERTO PARA LA MODELACIÓN DE SISTEMAS DE ALCANTARILLADO Y DRENAJE URBANO...



5.3 Escenarios de modelación.

Uno de los objetivos más importantes del presente trabajo es establecer modelos hidráulicos 1D que permitan simular la respuesta del sistema de alcantarillado de nuestra zona de estudio bajo diferentes condiciones de entrada. Estas variaciones incluyen modificaciones en las condiciones de lluvia, algunas de las cuales considerarán los efectos del cambio climático. Además, es fundamental tener en cuenta los motores de cálculo que se van a utilizar: el método explícito y el método implícito este último para SewerGEMS. A continuación, se detallan las diferencias entre estos métodos dentro de SewerGems: El motor se refiere al tipo de solución numérica de diferencias finitas utilizada para resolver las ecuaciones de St. Venant, que describen el flujo superficial no permanente en una dimensión.

El software incluye dos tipos de motores: el motor implícito y el motor SWMM. El motor implícito, basado en el solucionador del modelo FLDWAV del Servicio Meteorológico Nacional, utiliza un solucionador implícito de diferencias finitas de cuatro puntos para encontrar las soluciones numéricas de las ecuaciones hidrodinámicas de Saint-Venant, y tiende a ser más estable que un solucionador explícito. Por otro lado, el motor SWMM, que emplea el solucionador del modelo de gestión de aguas pluviales de la EPA, versión 5, es un solucionador explícito que, aunque más propenso a problemas de estabilidad, coincide exactamente con los resultados de SWMM 5.

COMPARACIÓN DE SOFTWARE PROPIETARIO FRENTE A SOLUCIONES DE CÓDIGO ABIERTO PARA LA MODELACIÓN DE SISTEMAS DE ALCANTARILLADO Y DRENAJE URBANO...

Una diferencia notable entre los dos motores es el manejo de la elevación inicial en las alcantarillas: el motor SWMM puede simular un proceso de llenado si la elevación inicial es menor que la elevación aguas abajo, mientras que el motor implícito asume que la elevación inicial es la misma que la aguas abajo. Además, las hidrográficas de afluencia se gestionan de manera diferente: el motor implícito interpola los caudales entre el caudal final en la hidrografía y el tiempo final, mientras que el motor SWMM asume que todos los caudales después del punto final de afluencia son cero.

Ahora bien, para esta investigación se tuvieron que definir cinco escenarios los cuales se explicaran a continuación:

5.3.1 Escenario 1: EPA-SWMM lluvia real vs SewerGEMS explícito lluvia real.

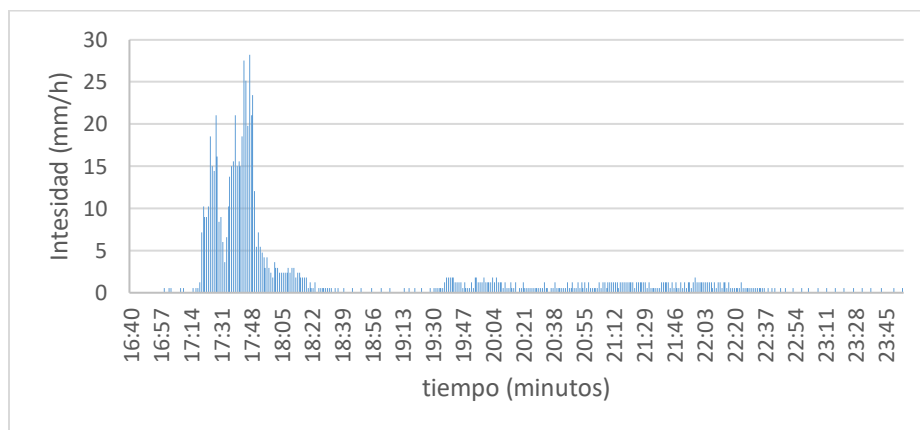
En este escenario, se comparará el modelado realizado por EPA-SWMM, un software de código libre, con el de SewerGEMS en su versión explícita, que utiliza el mismo motor que SWMM. Para este primer escenario, se empleará la lluvia del 11 de junio de 2021, la cual provocó el colapso de gran parte de la ciudad. Este evento dejó una víctima fatal en una de las laderas del área metropolitana y causó inundaciones significativas en nuestra área de estudio

5.3.2 Escenario 2: EPA-SWMM lluvia real con cambio climático vs SewerGEMS explícito lluvia real con cambio climático.

Para este escenario, se realizará una comparativa similar a la del escenario 1, con la diferencia de que la lluvia real será multiplicada por un factor de 25.38% debido al cambio climático. Este ajuste modificará las condiciones iniciales de la precipitación, aumentando el total de 756.6 (mm/h) a 948.63 (mm/h) y los picos máximos de 28.2 (mm/h) a 35.36 (mm/h). A continuación, se presentará el cambio en el hietograma de estas lluvias.

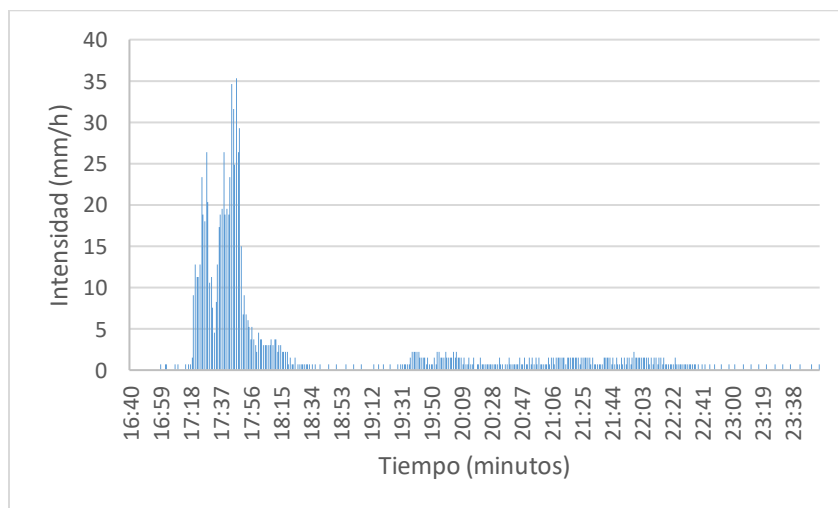
Figura 25. Hietograma lluvia real sin cambio climático.

COMPARACIÓN DE SOFTWARE PROPIETARIO FRENTE A SOLUCIONES DE CÓDIGO ABIERTO PARA LA MODELACIÓN DE SISTEMAS DE ALCANTARILLADO Y DRENAJE URBANO...



Nota. Fuente elaboración propia

Figura 26. Hietograma lluvia real con cambio climático.



Nota. Fuente elaboración propia

5.3.3 Escenario 3: EPA-SWMM IDF vs SewerGEMS explícito IDF.

En este escenario se replicará el procedimiento del escenario 1, pero con un cambio significativo: se utilizará una lluvia de diseño. Esta lluvia, previamente explicada, se ha creado bajo los parámetros de las curvas IDF (Intensidad-Duración-Frecuencia) de la jurisdicción de EPM. Esta

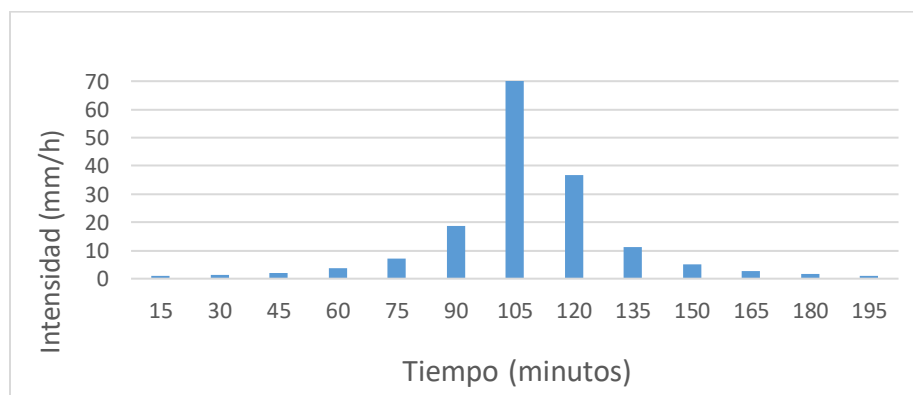
COMPARACIÓN DE SOFTWARE PROPIETARIO FRENTE A SOLUCIONES DE CÓDIGO ABIERTO PARA LA MODELACIÓN DE SISTEMAS DE ALCANTARILLADO Y DRENAJE URBANO...

metodología nos permite simular una lluvia súbita que podría representar afectaciones en la red de alcantarillado en el área de estudio.

5.3.4 Escenario 4: EPA-SWMM lluvia IDF con cambio climático vs SewerGEMS explicito lluvia IDF real con cambio climático.

Para este escenario, se realizará una comparación similar a la de los escenarios anteriores, pero con una diferencia, la lluvia de diseño se incrementará 25.38% como la lluvia real, debido al cambio climático. Este ajuste aumentará la precipitación total de 191.93 (mm/h) a 240.64 (mm/h) y los picos máximos de 99.87 (mm/h) a 125.22 (mm/h). A continuación, se mostrará el cambio en el hietograma resultante de estas lluvias.

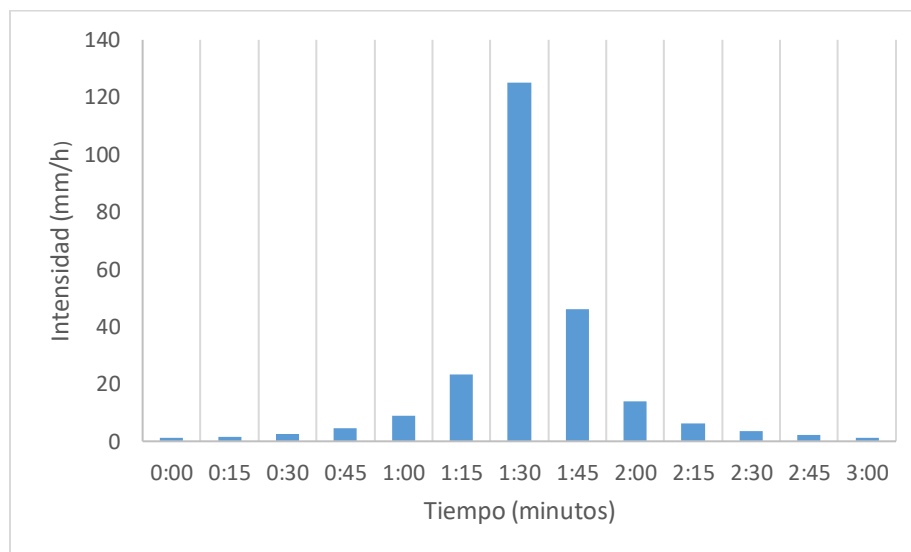
Figura 27. Hietograma lluvia de diseño sin cambio climático.



Nota. Fuente elaboración propia

Figura 28. Hietograma lluvia de diseño con cambio climático.

COMPARACIÓN DE SOFTWARE PROPIETARIO FRENTE A SOLUCIONES DE CÓDIGO ABIERTO PARA LA MODELACIÓN DE SISTEMAS DE ALCANTARILLADO Y DRENAJE URBANO...



Nota. *Fuente elaboración propia*

5.3.5 Escenario 5: Comparación de los motores de cálculo explícito SWMM e implícito en SewerGEMS

En este escenario, se llevará a cabo una evaluación detallada del desempeño de los motores de cálculo de ambos programas, con especial énfasis en las diferencias funcionales que presentan. Se investigará cómo la configuración de los intervalos de tiempo (time steps) afecta la estabilidad y precisión de los resultados. Es crucial determinar en qué punto ajustar estos intervalos puede llevar al software a volverse inestable y producir errores significativos, lo cual indica una menor fiabilidad en las lecturas obtenidas. Se considerará que el software muestra inestabilidad si el error supera el 5%, siendo más precisa la simulación a medida que se reducen los intervalos de tiempo.

Además de este análisis, se contrastarán los resultados obtenidos en escenarios con los motores de cálculo explícitos e implícitos, según se detalló previamente. Esto permitirá identificar cómo cada motor responde y se adapta a las condiciones específicas de modelado hidráulico, proporcionando percepciones sobre las ventajas y limitaciones de cada motor.

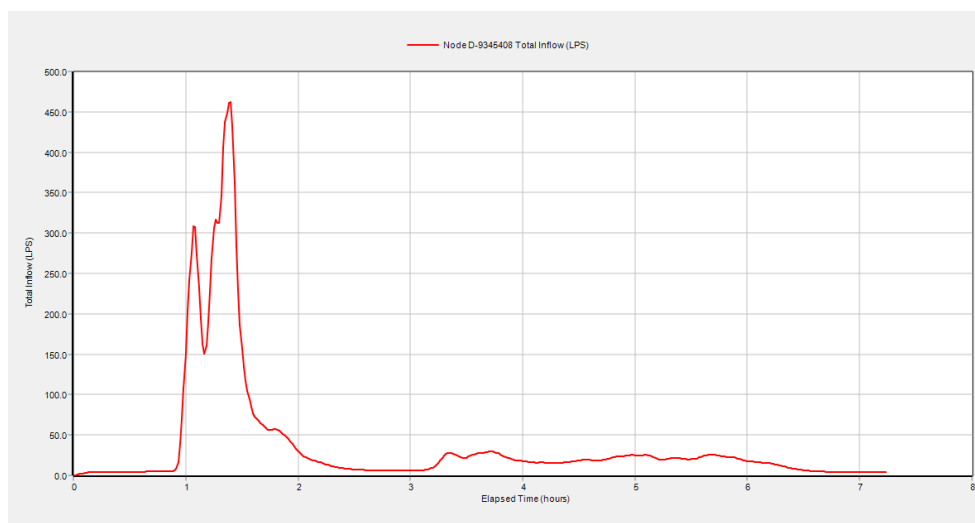
6 Resultados

6.1 Escenario 1: EPA-SWMM lluvia real vs SewerGEMS explícito lluvia real.

Para esta comparación se ejecutaron los modelos en ambos softwares con el fin de analizar en detalle las características de cada uno. Los resultados obtenidos en ambos casos fueron idénticos, dado que el motor de cálculo utilizado por SewerGEMS es el mismo que emplea SWMM (¿Cuál Es La Diferencia Entre Los Motores Implícitos Y SWMM?, n.d.) Por lo tanto, las funcionalidades ofrecidas por ambos programas son completamente idénticas en términos de rendimiento y capacidades.

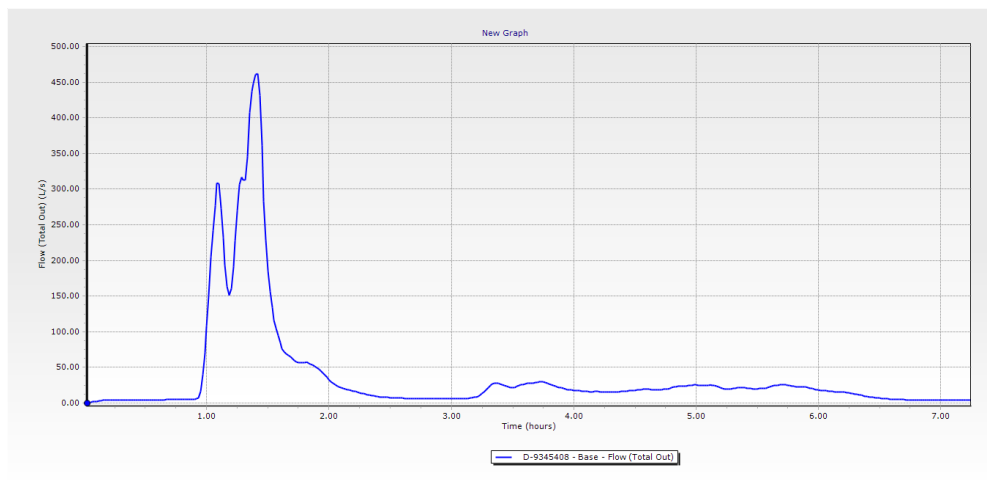
En las siguientes figuras podremos observar el comportamiento del flujo de agua en la descarga D-9345408, ubicada al final del sistema. Se puede apreciar que el pico más alto, donde se registra el mayor flujo de agua, ocurre en ambos momentos a la 1 hora y 24 minutos. Además, durante este pico máximo, el caudal alcanza su punto más alto, superando los 461.80 (L/s).

Figura 29. Flujo máximo en EPA-SWMM de la descarga D-9345408.



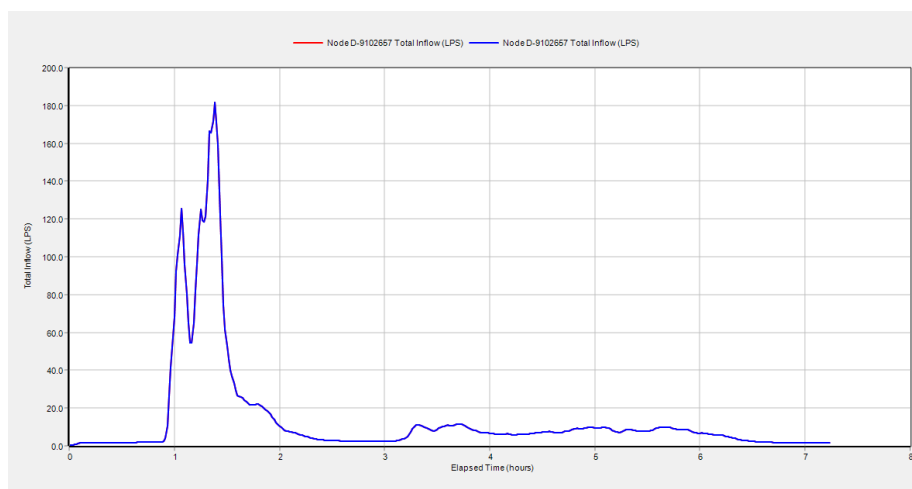
COMPARACIÓN DE SOFTWARE PROPIETARIO FRENTE A SOLUCIONES DE CÓDIGO ABIERTO PARA LA MODELACIÓN DE SISTEMAS DE ALCANTARILLADO Y DRENAJE URBANO...

Figura 30. Flujo máximo en SewerGEMS de la descarga D-9345408.



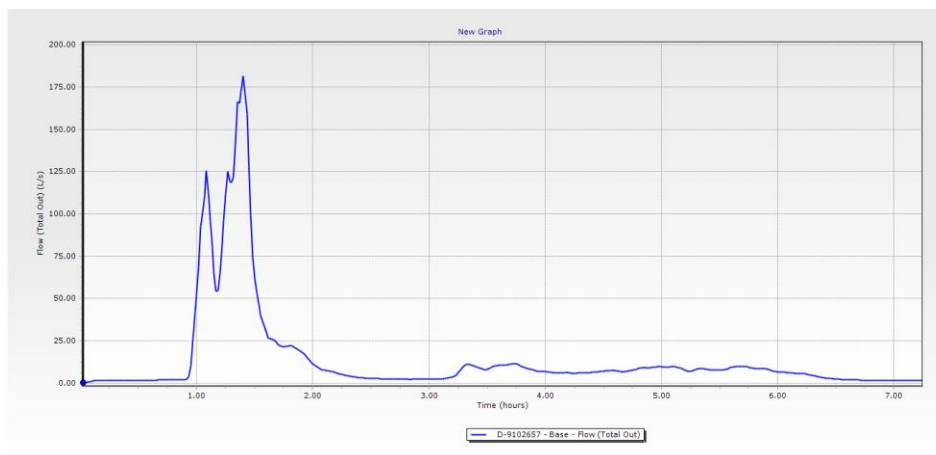
Para asegurarnos de que ambos softwares se comportan de manera idéntica, se decidió generar gráficos similares a los anteriores para la descarga D-9102657 aguas arriba de nuestra red. Las siguientes figuras ilustrarán este proceso, demostrando que ambos programas exhibieron el mismo comportamiento. Se observó que el caudal máximo ocurrió en la primera hora con 23 minutos, alcanzando un valor máximo de 181.53 (L/s).

Figura 31. Flujo máximo en EPA-SWMM de la descarga D-9102657.



COMPARACIÓN DE SOFTWARE PROPIETARIO FRENTE A SOLUCIONES DE CÓDIGO ABIERTO PARA LA MODELACIÓN DE SISTEMAS DE ALCANTARILLADO Y DRENAJE URBANO...

Figura 32. Flujo máximo en SewerGEMS de la descarga D-9102657.



Además, podemos concluir que se obtuvieron resultados idénticos en cuanto a las inundaciones, excepto por una cámara de inspección identificada con el ID 6159605 que se encontraba inundada en ambos softwares. Esto sugiere que ambos programas manejan este escenario utilizando el mismo motor de cálculo explícito (¿Cuál Es La Diferencia Entre Los Motores Implícitos Y SWMM?, n.d.).

En las figuras siguientes, se observa una ligera discrepancia para EPA-SWMM, donde el máximo registrado es de 3.57 (L/s), mientras que en SewerGEMS es de 3.59 (L/s). Este pequeño cambio se considera insignificante, ya que no tiene un efecto significativo en el sistema.

Figura 33. Datos arrojados por EPA-SWMM de la cámara de inspección inundada.

Topic: Node Flooding Click a column header to sort the column.						
Node	Hours Flooded	Maximum Rate LPS	Day of Maximum Flooding	Hour of Maximum Flooding	Total Flood Volume 10 ⁶ ltr	Maximum Poned Depth Meters
6159605	0.01	3.57	0	01:23	0.000	0.000

Figura 34. Datos arrojados por SewerGEMS de la cámara de inspección inundada.

COMPARACIÓN DE SOFTWARE PROPIETARIO FRENTE A SOLUCIONES DE CÓDIGO ABIERTO PARA LA MODELACIÓN DE SISTEMAS DE ALCANTARILLADO Y DRENAJE URBANO...

```

*****
Node Flooding Summary
*****

Flooding refers to all water that overflows a node, whether it ponds or not.
-----

```

Node	Hours Flooded	Maximum Rate LPS	Time of Max Occurrence days hr:min	Total Flood Volume 10 ⁶ ltr	Maximum Poned Depth Meters
6159605	0.01	3.59	0 01:23	0.000	0.000

Dado esto, se mostrará los perfiles de la cámara de inspección inundada correspondiente con el ID 6159605 para ambos softwares.

Figura 35. Perfil generado en EPA-SWMM, para cámara de inspección inundada.

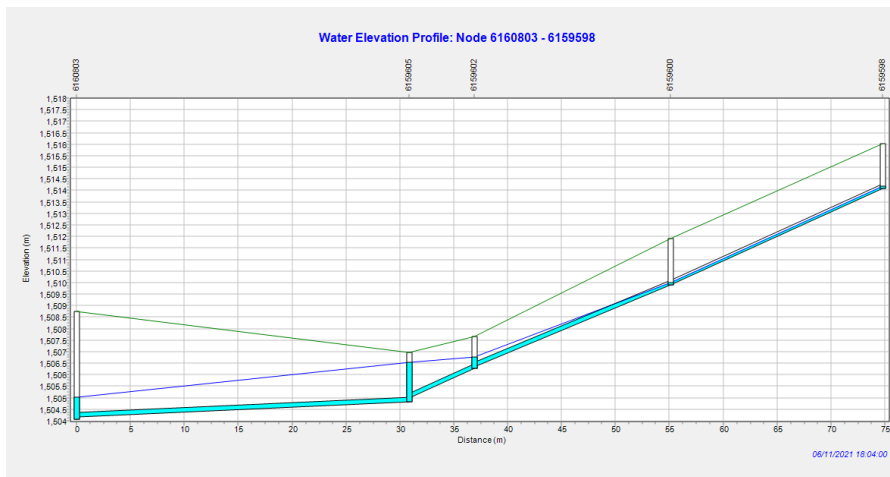
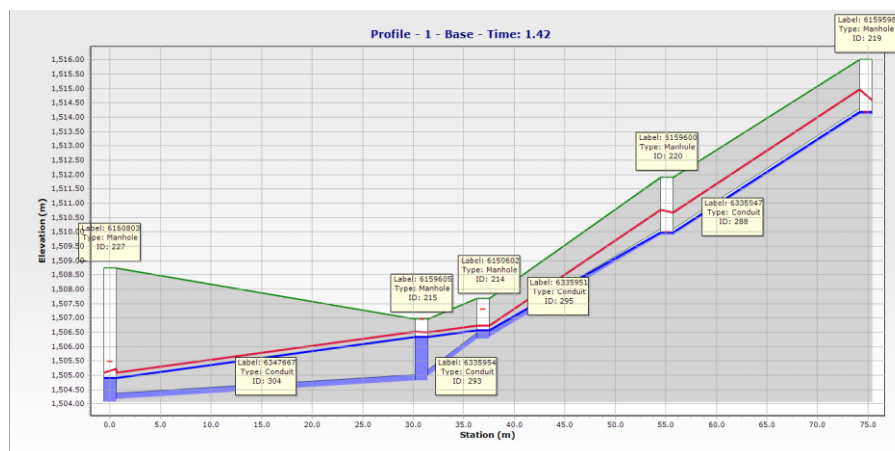


Figura 36. Perfil generado en SewerGEMS, para cámara de inspección inundada.



6.2 Escenario 2: EPA-SWMM lluvia real con cambio climático vs SewerGEMS explícito lluvia real con cambio climático.

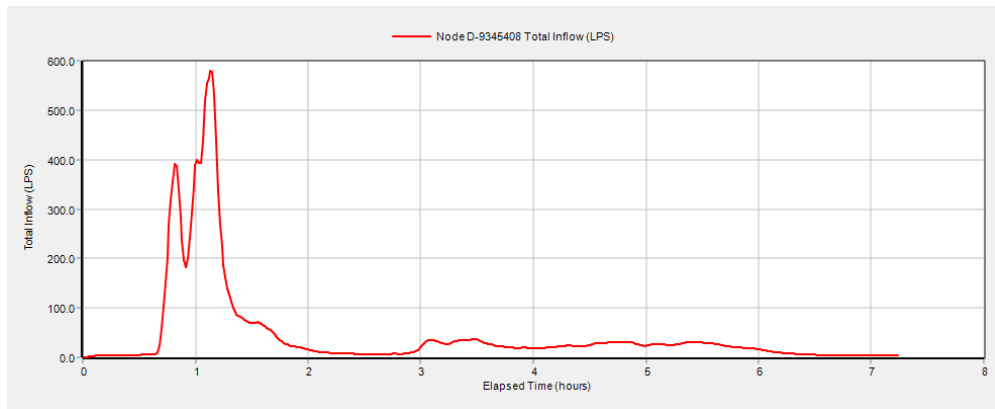
Para este escenario se consideró el impacto del cambio climático, que resulta en un aumento de la precipitación. En este caso específico, se observó un incremento en los niveles de salida en las descargas. Sin embargo, no se detectaron cambios significativos entre los dos softwares, ya que ambos mostraron resultados de salida idénticos para ambas descargas.

Comparando con el escenario previamente estudiado, se identificó una cámara de inspección adicional inundada. Esto resalta la importancia de considerar el efecto del cambio climático en cualquier proyecto relacionado con precipitaciones (“Desde La Calidad Hasta La Disponibilidad, El Efecto De Este Fenómeno En Los Recursos Hídricos Es Cada Vez Más Visible. ¿En Qué Impacta Y Cómo Se Debe Afrontar?,” 2024). Este factor puede generar discrepancias significativas entre simulaciones, lo que es crucial para tomar decisiones eficaces frente a eventos de inundación.

En las siguientes figuras se puede observar el comportamiento del flujo de agua en la descarga D-9345408, ubicada al final del sistema. Se destaca que el pico más alto, donde se registra el mayor flujo de agua, ocurre en ambos momentos a la 1 hora y 8 minutos. Durante este pico máximo, el caudal aumentó significativamente de 461.80 (L/s) a 579.63 (L/s). Por otro lado, para la descarga D-9102657 aguas arriba del sistema, el caudal pasó de 181.53 (L/s) a 218.95 (L/s) para el mismo momento analizado.

Figura 37. Flujo máximo en EPA-SWMM de la descarga D-9345408.

COMPARACIÓN DE SOFTWARE PROPIETARIO FRENTE A SOLUCIONES DE CÓDIGO ABIERTO PARA LA MODELACIÓN DE SISTEMAS DE ALCANTARILLADO Y DRENAJE URBANO...



COMPARACIÓN DE SOFTWARE PROPIETARIO FRENTE A SOLUCIONES DE CÓDIGO ABIERTO PARA LA MODELACIÓN DE SISTEMAS DE ALCANTARILLADO Y DRENAJE URBANO...

Figura 38. Flujo máximo en SewerGEMS de la descarga D-9345408.

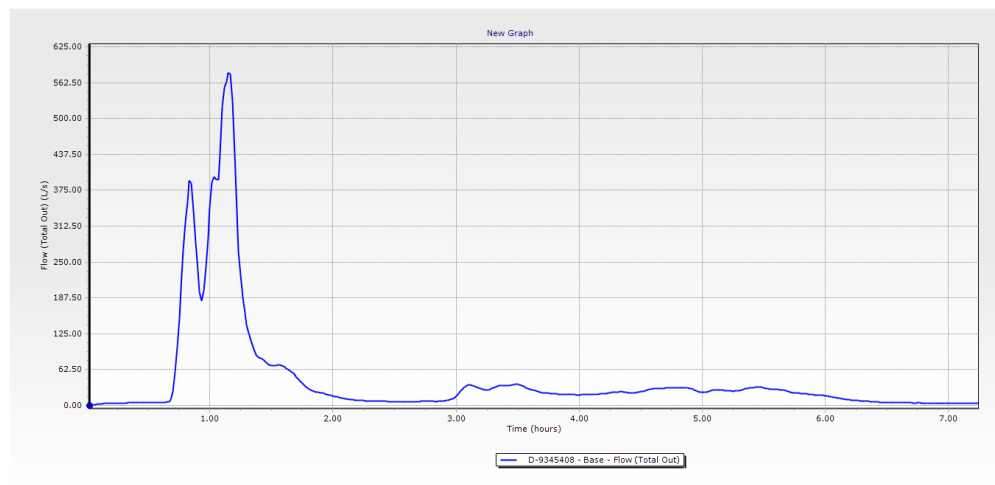


Figura 39. Flujo máximo en EPA-SWMM de la descarga D-9102657.

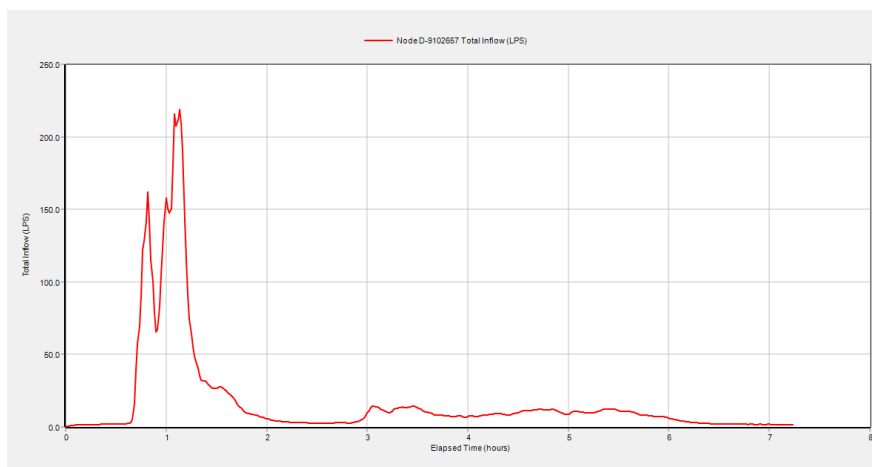
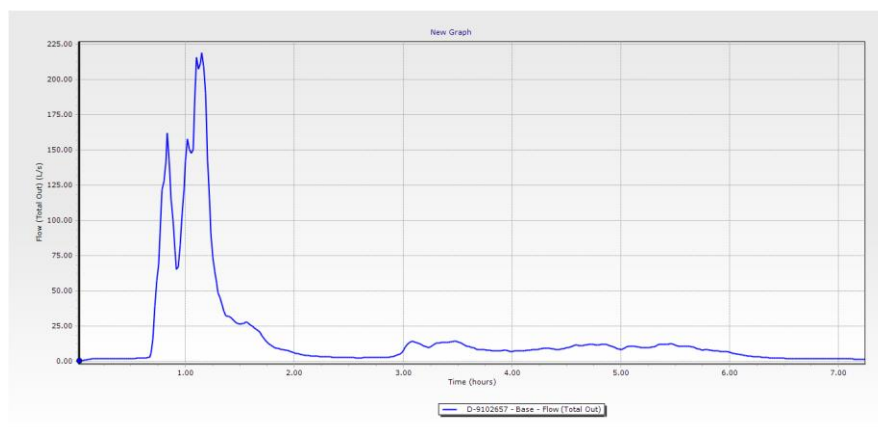


Figura 40. Flujo máximo en SewerGEMS de la descarga D-9102657.



COMPARACIÓN DE SOFTWARE PROPIETARIO FRENTE A SOLUCIONES DE CÓDIGO ABIERTO PARA LA MODELACIÓN DE SISTEMAS DE ALCANTARILLADO Y DRENAJE URBANO...

Además, se presentarán los informes de las cámaras de inspección inundadas tanto para EPA-SWMM como para SewerGEMS. En ambos casos, se observa una ligera variación similar a la del escenario anterior, la cual no tiene un impacto significativo en el sistema y por lo tanto puede considerarse despreciable.

Figura 41. Datos arrojados por EPA-SWMM de las cámaras de inspección inundada.

Node	Hours Flooded	Maximum Rate LPS	Day of Maximum Flooding	Hour of Maximum Flooding	Total Flood Volume 10 ⁶ ltr	Maximum Poned Depth Meters
6159602	0.01	12.18	0	01:05	0.000	0.000
6159605	0.09	20.25	0	01:08	0.005	0.000

Figura 42. Datos arrojados por SewerGEMS de las cámaras de inspección inundada.

```

Node Flooding Summary
*****

Flooding refers to all water that overflows a node, whether it ponds or not.
-----
Node           Hours           Maximum   Time of Max   Total   Maximum
              Flooded         Rate      Occurrence   Flood   Poned
              (hr:min)        LPS      days hr:min  Volume Depth
              (hr:min)        LPS      days hr:min  (10^6 ltr) (Meters)
-----
6159602         0.01           12.19      0 01:05        0.000   0.000
6159605         0.09           20.25      0 01:08        0.005   0.000

```

En la siguiente figura podemos apreciar el perfil hidráulico del momento de inundación de la cámara de inspección con el ID 6159602, ya que a comparación del escenario 1, este fue la nueva cámara que se inundó por tener en cuenta la mayoración del cambio climático.

COMPARACIÓN DE SOFTWARE PROPIETARIO FRENTE A SOLUCIONES DE CÓDIGO ABIERTO PARA LA MODELACIÓN DE SISTEMAS DE ALCANTARILLADO Y DRENAJE URBANO...

Figura 43. Perfil generado en EPA-SWMM, para cámaras de inspección inundadas.

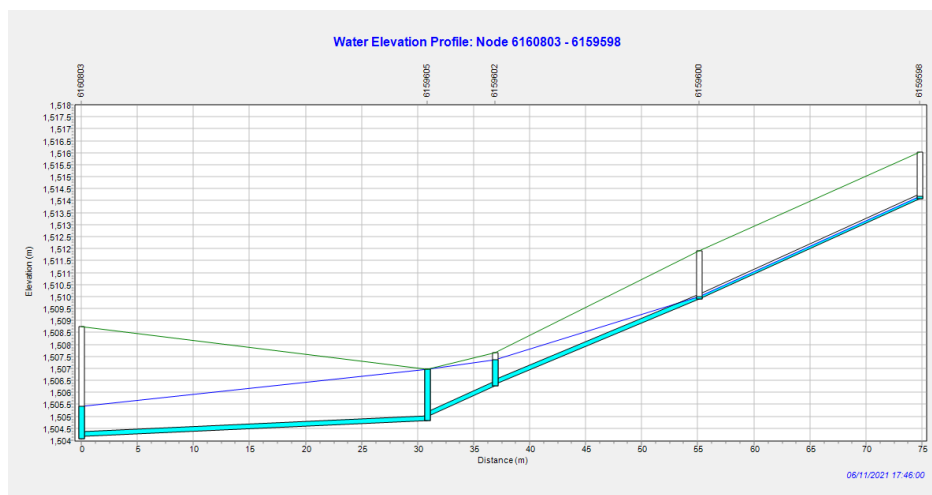
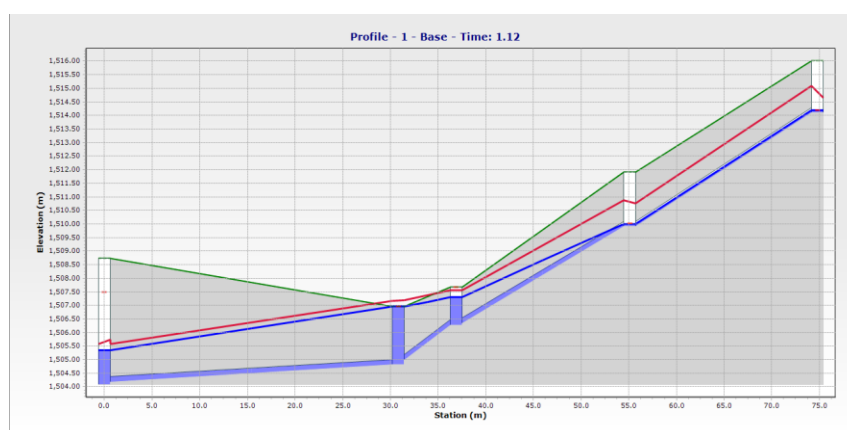


Figura 44. Perfil generado en SewerGEMS, para cámaras de inspección inundadas.



6.3 Escenario 3: EPA-SWMM lluvia IDF vs SewerGEMS explícito lluvia IDF.

En este caso, se llevó a cabo el mismo proceso que en los escenarios anteriores, obteniendo resultados consistentes en la comparación de ambos softwares. A pesar de tratarse de una lluvia de mayor intensidad, se observaron resultados similares entre ambos programas, lo cual refuerza la idea de que están diseñados con el mismo motor explícito (Wpadmin, 2024).

Los únicos cambios significativos en la modelación se debieron a la intensidad de la lluvia, lo que resultó en un aumento en el número de nodos inundados y variaciones en los caudales de agua debido a las condiciones climáticas diferentes. No obstante, desde un punto de vista funcional, es evidente que ambos softwares operan de manera consistente y con resultados comparables.

COMPARACIÓN DE SOFTWARE PROPIETARIO FRENTE A SOLUCIONES DE CÓDIGO ABIERTO PARA LA MODELACIÓN DE SISTEMAS DE ALCANTARILLADO Y DRENAJE URBANO...

En las siguientes figuras podremos ver una comparación de la descarga D-9345408 la cual nos puede mostrar fielmente la teoría que ambos softwares funcionan bajo el mismo método explicito.

Figura 45. Flujo máximo en EPA-SWMM de la descarga D-9345408.

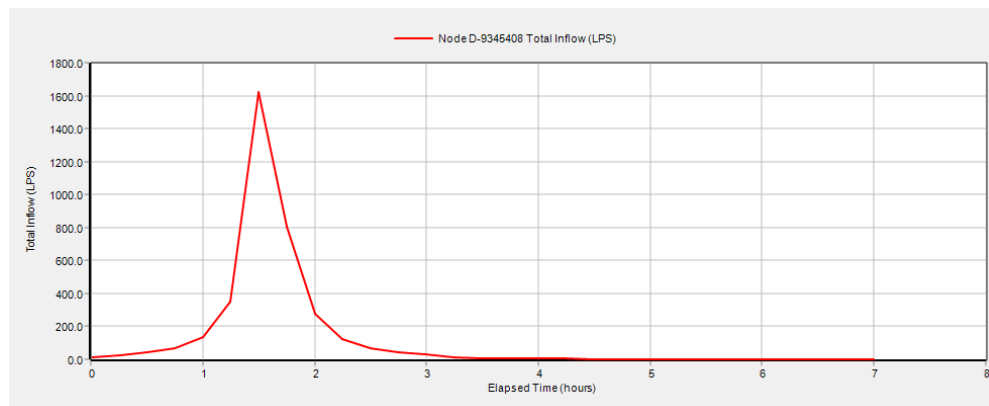
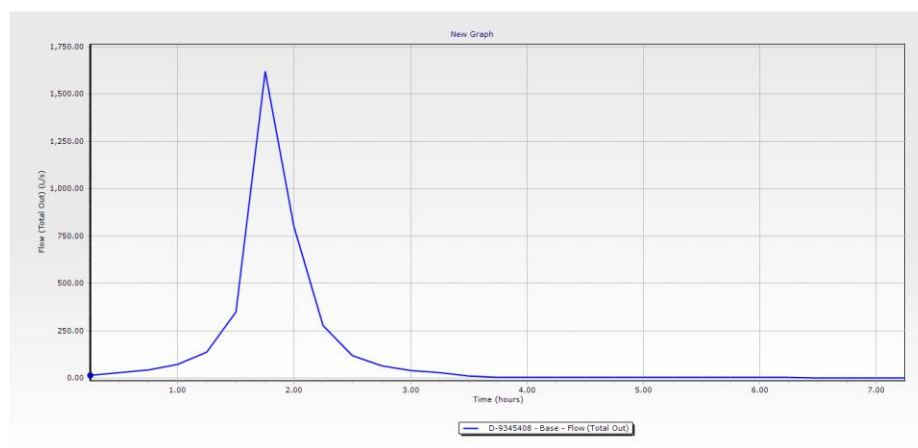


Figura 46. Flujo máximo en SewerGEMS de la descarga D-9345408.



Ahora bien, para este escenario de estudio se encontraron 10 cámaras de inspección inundadas las cuales fueron las veremos reflejadas en las siguientes figuras

COMPARACIÓN DE SOFTWARE PROPIETARIO FRENTE A SOLUCIONES DE CÓDIGO ABIERTO PARA LA MODELACIÓN DE SISTEMAS DE ALCANTARILLADO Y DRENAJE URBANO...

Figura 47. Datos arrojados por EPA-SWMM de las cámaras de inspección inundadas.

Topic: Node Flooding <input type="text"/> Click a column header to sort the column.						
Node	Hours Flooded	Maximum Rate LPS	Day of Maximum Flooding	Hour of Maximum Flooding	Total Flood Volume 10 ⁶ ltr	Maximum Ponded Depth Meters
6159271	0.34	69.22	0	01:45	0.050	0.000
6159272	0.01	21.75	0	01:36	0.000	0.000
9066236	0.01	20.27	0	01:41	0.000	0.000
6159408	0.05	6.31	0	01:45	0.001	0.000
6159602	0.44	44.29	0	01:45	0.057	0.000
6159605	0.60	107.53	0	01:45	0.138	0.000
6159600	0.07	1.71	0	01:45	0.000	0.000
6159276	0.21	42.66	0	01:45	0.017	0.000
6159701	0.01	16.64	0	01:39	0.000	0.000
6159597	0.28	96.79	0	01:45	0.057	0.000

Figura 48. Datos arrojados por SewerGEMS de las cámaras de inspección inundadas.

```

Node Flooding Summary
*****

Flooding refers to all water that overflows a node, whether it ponds or not.
-----

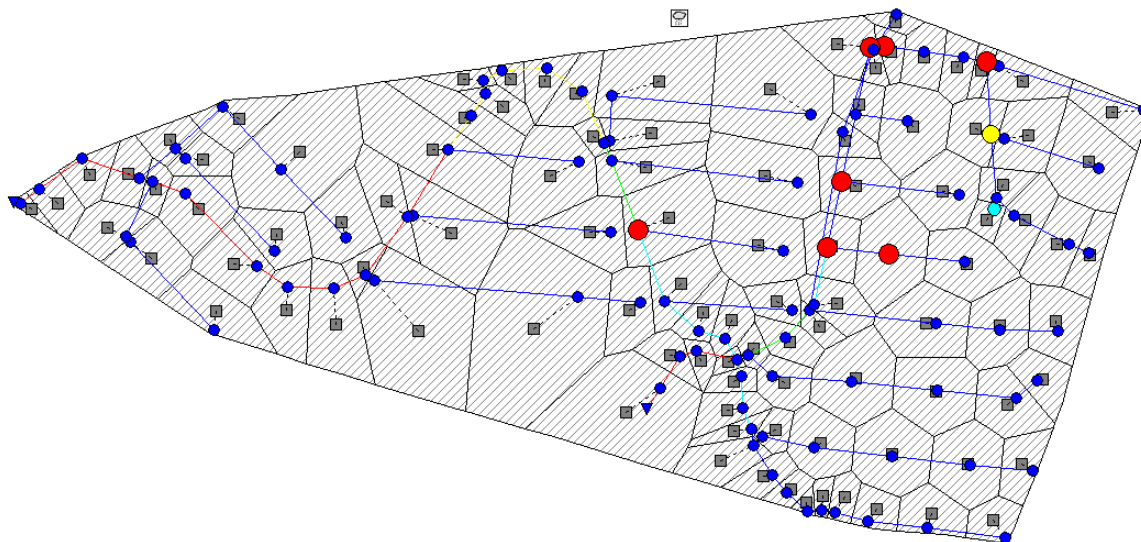
```

Node	Hours Flooded	Maximum Rate LPS	Time of Max Occurrence days hr:min	Total Flood Volume 10 ⁶ ltr	Maximum Ponded Depth Meters
6159271	0.34	69.22	0 01:45	0.050	0.000
6159272	0.01	21.73	0 01:36	0.000	0.000
9066236	0.01	20.26	0 01:41	0.000	0.000
6159408	0.05	6.33	0 01:45	0.001	0.000
6159602	0.44	44.29	0 01:45	0.057	0.000
6159605	0.60	107.54	0 01:45	0.138	0.000
6159600	0.07	1.71	0 01:45	0.000	0.000
6159276	0.21	42.67	0 01:45	0.017	0.000
6159701	0.01	16.30	0 01:39	0.000	0.000
6159597	0.28	96.80	0 01:45	0.057	0.000

Además de esto, a diferencia de los escenarios anteriores, podemos identificar las cámaras de inspección desde la interfaz del programa, en este caso utilizando EPA-SWMM, las cuales estarán resaltadas en color rojo

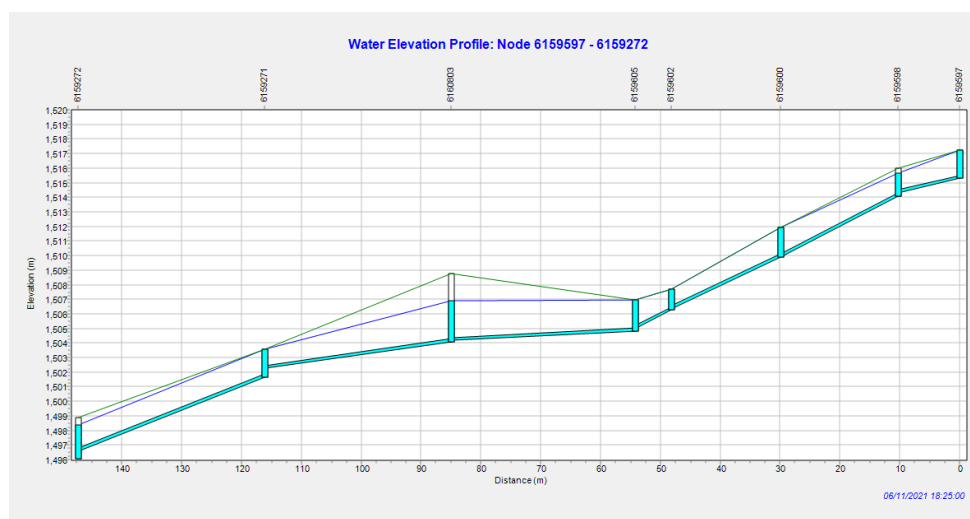
COMPARACIÓN DE SOFTWARE PROPIETARIO FRENTE A SOLUCIONES DE CÓDIGO ABIERTO PARA LA MODELACIÓN DE SISTEMAS DE ALCANTARILLADO Y DRENAJE URBANO...

Figura 49. Cámaras de inspección inundadas desde EPA-SWMM



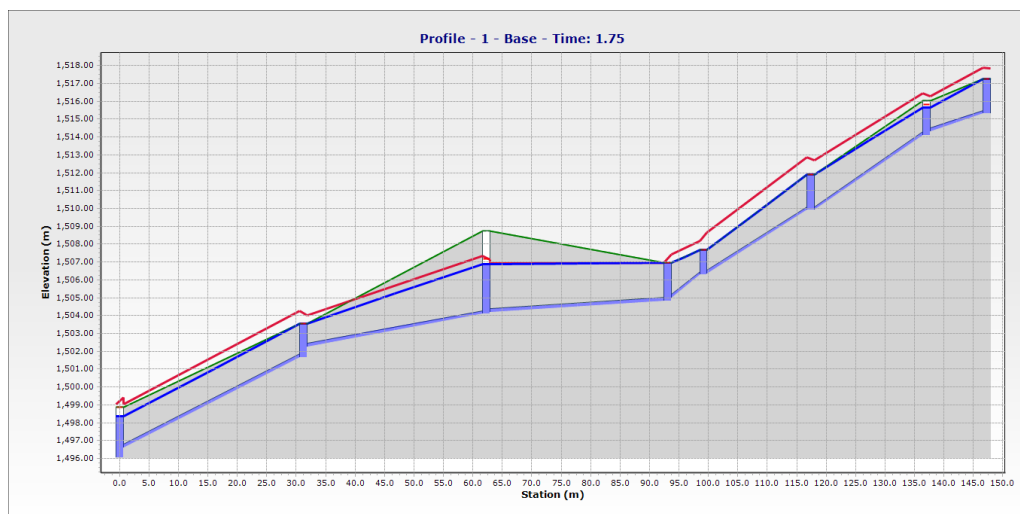
A continuación, se verán el perfil hidráulico de un sector con varias cámaras de inspección inundadas para ambos softwares.

Figura 50. Perfil generado en EPA-SWMM, para cámaras de inspección inundadas.



COMPARACIÓN DE SOFTWARE PROPIETARIO FRENTE A SOLUCIONES DE CÓDIGO ABIERTO PARA LA MODELACIÓN DE SISTEMAS DE ALCANTARILLADO Y DRENAJE URBANO...

Figura 51. Perfil generado en SewerGEMS, para cámaras de inspección inundadas.



6.4 Escenario 4: EPA-SWMM lluvia IDF con cambio climático vs SewerGEMS explícito lluvia IDF real con cambio climático.

Como se mencionó anteriormente para los escenarios previos, en este caso, aunque la precipitación fue ligeramente mayor debido al componente de cambio climático, se obtuvieron los mismos resultados en ambos softwares, confirmando que ambos operan con el mismo motor explícito (Wpadmin, 2024). Al comparar los resultados, quedó claro que los programas ofrecieron salidas muy similares. Las discrepancias menores observadas no tienen un impacto significativo en la red y, por tanto, pueden considerarse despreciables.

Al igual que en el escenario 2, es crucial considerar el cambio climático en cualquier proyecto relacionado con eventos pluviales. Este escenario 4, en comparación con el escenario 3, mostró una cámara de inspección adicional inundada, subrayando la importancia de incluir información climática actualizada en las simulaciones. (“Desde La Calidad Hasta La Disponibilidad, El Efecto De Este Fenómeno En Los Recursos Hídricos Es Cada Vez Más Visible. ¿En Qué Impacta Y Cómo Se Debe Afrontar?,” 2024). En las siguientes figuras se verá el aumento en las gráficas de la descarga D-9345408 del final del sistema por el efecto del cambio climático.

COMPARACIÓN DE SOFTWARE PROPIETARIO FRENTE A SOLUCIONES DE CÓDIGO ABIERTO PARA LA MODELACIÓN DE SISTEMAS DE ALCANTARILLADO Y DRENAJE URBANO...

Figura 52. Flujo máximo en EPA-SWMM de la descarga D-9345408 con cambio climático.

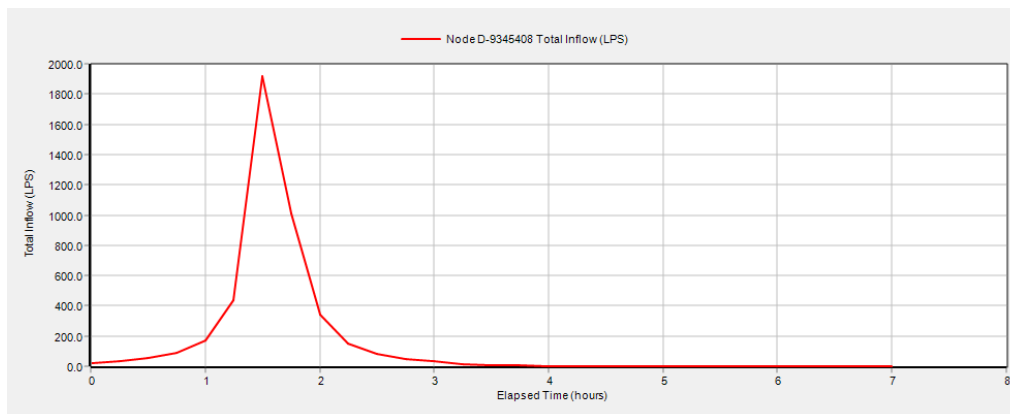
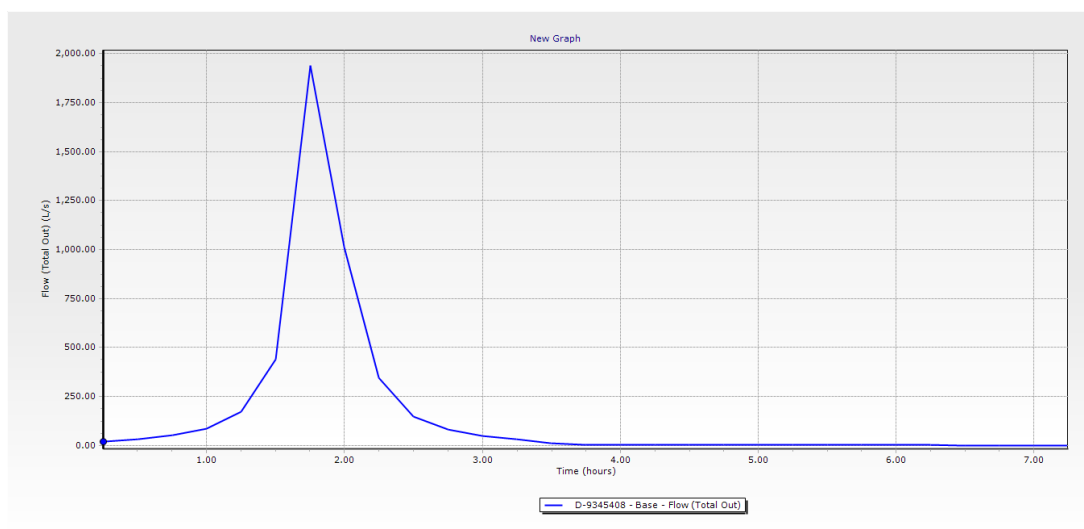


Figura 53. Flujo máximo en SewerGEMS de la descarga D-9345408 con cambio climático.



Adicionalmente, en las Figuras 51 y 52 se presentarán los reportes de las cámaras de inspección inundadas obtenidos de EPA-SWMM y SewerGEMS, respectivamente

COMPARACIÓN DE SOFTWARE PROPIETARIO FRENTE A SOLUCIONES DE CÓDIGO ABIERTO PARA LA MODELACIÓN DE SISTEMAS DE ALCANTARILLADO Y DRENAJE URBANO...

Figura 54. Datos arrojados por EPA-SWMM de las cámaras de inspección inundadas.

Topic: Node Flooding Click a column header to sort the column.						
Node	Hours Flooded	Maximum Rate LPS	Day of Maximum Flooding	Hour of Maximum Flooding	Total Flood Volume 10 ⁶ ltr	Maximum Poned Depth Meters
6159026	0.10	48.22	0	01:45	0.007	0.000
9066129	0.01	15.49	0	01:42	0.000	0.000
6159271	0.41	94.90	0	01:45	0.082	0.000
6159272	0.01	24.67	0	01:35	0.000	0.000
9066236	0.05	25.29	0	01:45	0.003	0.000
6159408	0.19	31.45	0	01:45	0.010	0.000
6159602	0.52	45.86	0	01:45	0.071	0.000
6159605	0.66	132.71	0	01:45	0.180	0.000
6159600	0.20	6.42	0	01:45	0.002	0.000
6159276	0.30	77.94	0	01:45	0.045	0.000
6159597	0.37	129.52	0	01:45	0.104	0.000

Figura 55. Datos arrojados por SewerGEMS de las cámaras de inspección inundadas.

```

Node Flooding Summary
*****

Flooding refers to all water that overflows a node, whether it ponds or not.
-----

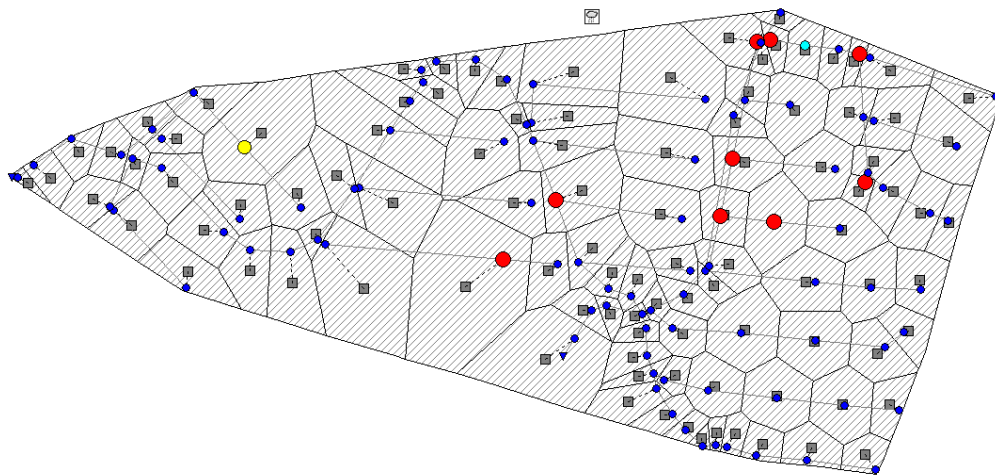
```

Node	Hours Flooded	Maximum Rate LPS	Time of Max Occurrence days hr:min	Total Flood Volume 10 ⁶ ltr	Maximum Poned Depth Meters
6159026	0.10	47.25	0 01:45	0.007	0.000
9066129	0.01	15.47	0 01:42	0.000	0.000
6159271	0.41	94.90	0 01:45	0.082	0.000
6159272	0.01	24.63	0 01:35	0.000	0.000
9066236	0.05	25.30	0 01:45	0.003	0.000
6159408	0.19	31.44	0 01:45	0.010	0.000
6159602	0.52	45.86	0 01:45	0.071	0.000
6159605	0.66	132.71	0 01:45	0.180	0.000
6159600	0.20	6.42	0 01:45	0.002	0.000
6159276	0.30	77.95	0 01:45	0.045	0.000
6159597	0.37	129.52	0 01:45	0.104	0.000

En la siguiente figura mostraran en color rojo las cámaras de inspección inundadas.

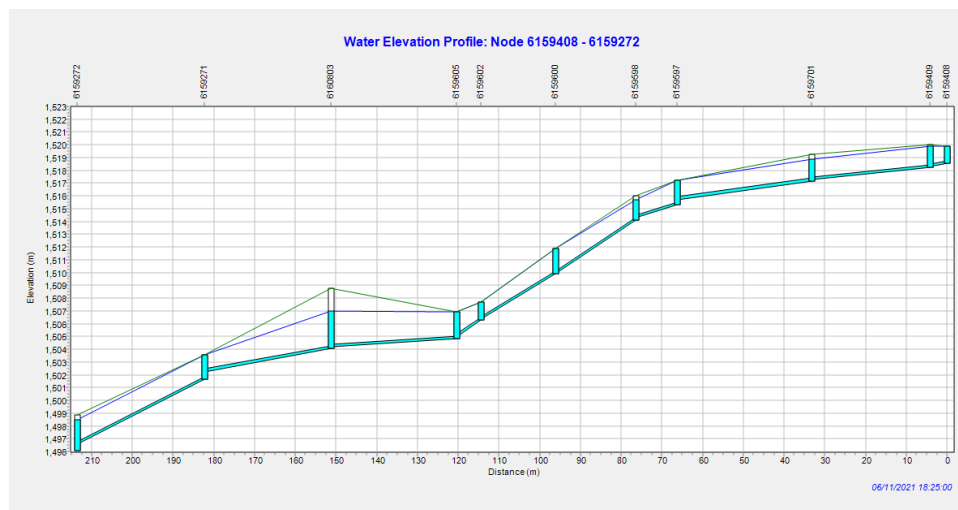
COMPARACIÓN DE SOFTWARE PROPIETARIO FRENTE A SOLUCIONES DE CÓDIGO ABIERTO PARA LA MODELACIÓN DE SISTEMAS DE ALCANTARILLADO Y DRENAJE URBANO...

Figura 56. Cámaras de inspección inundadas desde EPA-SWMM



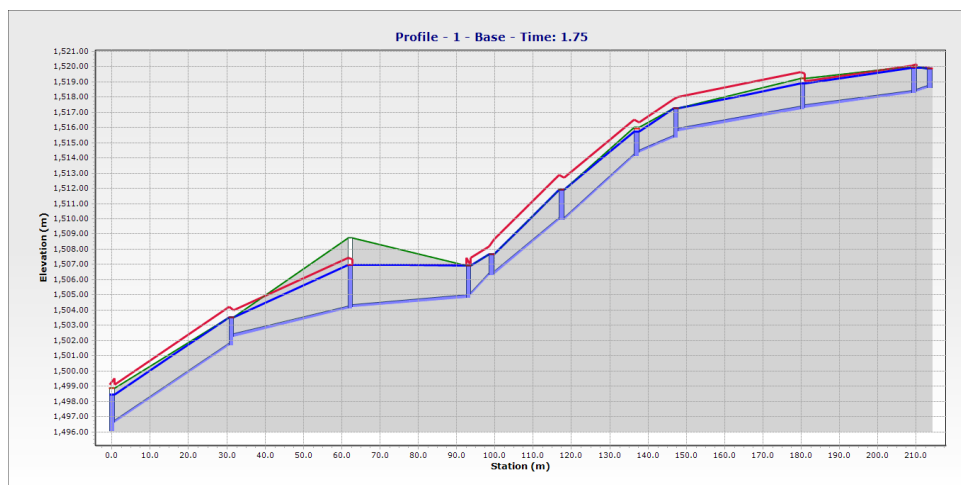
A continuación, se verá el perfil hidráulico de algunas cámaras de inspección inundadas.

Figura 57. Perfil generado en EPA-SWMM, para cámaras de inspección inundadas.



COMPARACIÓN DE SOFTWARE PROPIETARIO FRENTE A SOLUCIONES DE CÓDIGO ABIERTO PARA LA MODELACIÓN DE SISTEMAS DE ALCANTARILLADO Y DRENAJE URBANO...

Figura 58. Perfil generado en SewerGEMS, para cámaras de inspección inundadas.



6.5 Escenario 5: Comparación de los motores de cálculo explícito SWMM e implícito en SewerGEMS con la lluvia de diseño con cambio climático.

En SewerGEMS, la elección entre los motores de simulación explícitos e implícitos es crucial para el desempeño y la precisión de los modelos hidráulicos. El motor implícito se destaca por su estabilidad, siendo más adecuado para redes grandes y complejas, ya que resuelve sistemas de ecuaciones simultáneas, lo que lo hace más robusto y preciso en simulaciones a largo plazo y condiciones de flujo variable. Sin embargo, esta estabilidad tiene un costo en términos de tiempo de cálculo, ya que suele ser más lento debido a la complejidad de las operaciones matemáticas involucradas (¿Cuál Es La Diferencia Entre Los Motores Implícitos Y SWMM?, n.d.).

Por otro lado, el motor explícito es generalmente más rápido, lo que puede ser una ventaja significativa cuando los recursos computacionales son limitados o se necesita obtener resultados en un menor tiempo. No obstante, esta rapidez viene con el desafío de la estabilidad, ya que los motores explícitos pueden requerir pasos de tiempo más pequeños para mantener la precisión y evitar inestabilidades numéricas. Este tipo de motor es más adecuado para simulaciones a corto plazo o en redes menos complejas (¿Cuál Es La Diferencia Entre Los Motores Implícitos Y SWMM?, n.d.).

COMPARACIÓN DE SOFTWARE PROPIETARIO FRENTE A SOLUCIONES DE CÓDIGO ABIERTO PARA LA MODELACIÓN DE SISTEMAS DE ALCANTARILLADO Y DRENAJE URBANO...

Además de esto, las gráficas de flujo del motor explícito suelen ser menos pronunciadas que las del motor implícito debido a la disipación numérica inherente al motor explícito, que suaviza las fluctuaciones del flujo y reduce los picos. El motor explícito utiliza pasos de tiempo pequeños y directos, lo que subestima los flujos máximos. En contraste, el motor implícito maneja mejor las condiciones de flujo variable y las interacciones complejas, proporcionando una representación más precisa de los picos de flujo, resultando en gráficas con flujos más altos y pronunciados. Todo lo anterior se demostrará en las siguientes figuras, donde se evidenciará cómo cambia el caudal en las gráficas de las dos descargas.

Figura 59. Flujo máximo de la descarga D-9345408 con el motor explícito.

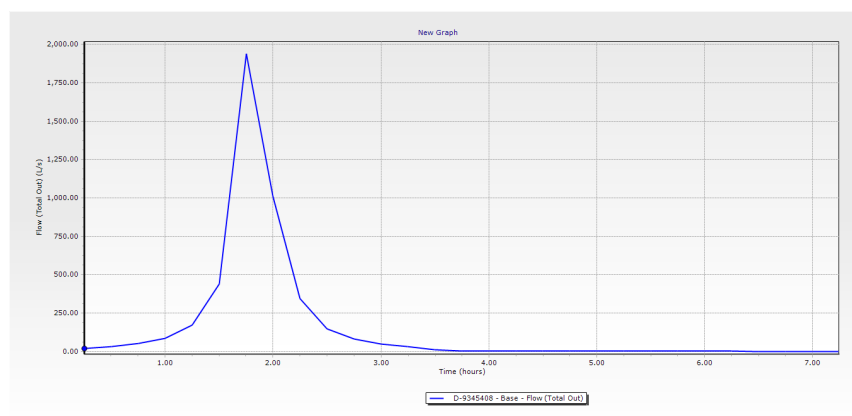
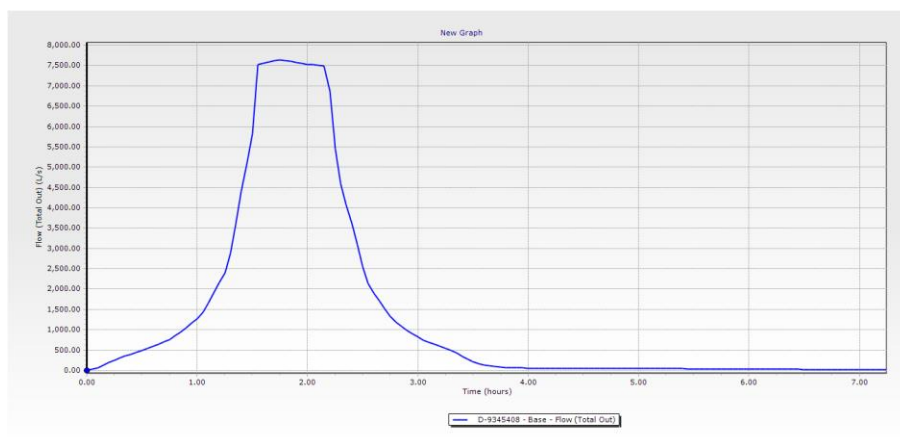


Figura 60. Flujo máximo de la descarga D-9345408 con el motor implícito.



COMPARACIÓN DE SOFTWARE PROPIETARIO FRENTE A SOLUCIONES DE CÓDIGO ABIERTO PARA LA MODELACIÓN DE SISTEMAS DE ALCANTARILLADO Y DRENAJE URBANO...

Figura 61. Flujo máximo de la descarga D-9102657 con el motor explícito.

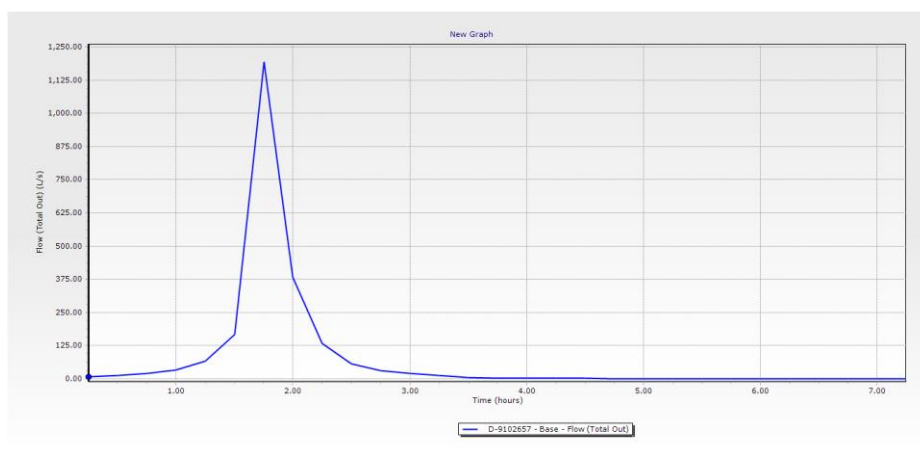
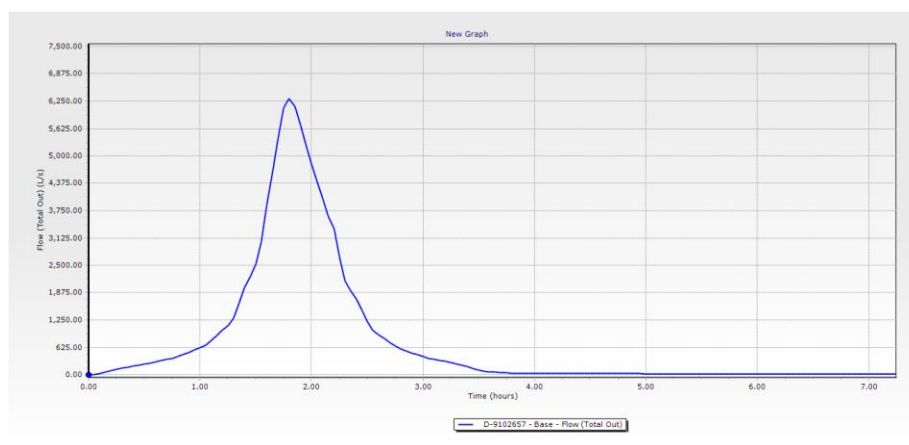


Figura 62. Flujo máximo de la descarga D-9102657 con el motor implícito.



En las figuras anteriores queda demostrado este comportamiento, lo cual confirma que los motores explícito e implícito tienen formas diferentes de solucionar las ecuaciones de flujo. Además, esto se confirma con la cantidad de cámaras de inspección inundadas: en el método explícito solo aparecían 10 cámaras inundadas, mientras que en el método implícito este número ascendió a 17. A continuación, se presentarán las figuras que ilustran este aumento en las cámaras de inspección inundadas, destacando la mayor precisión y detalle del motor implícito en capturar

COMPARACIÓN DE SOFTWARE PROPIETARIO FRENTE A SOLUCIONES DE CÓDIGO ABIERTO PARA LA MODELACIÓN DE SISTEMAS DE ALCANTARILLADO Y DRENAJE URBANO...

las condiciones de inundación (¿Cuál Es La Diferencia Entre Los Motores Implícitos Y SWMM?, n.d.).

Figura 63. Datos arrojados por el motor explícito de las cámaras de inspección inundadas.

```

Node Flooding Summary
*****

Flooding refers to all water that overflows a node, whether it ponds or not.
-----

```

Node	Hours Flooded	Maximum Rate LPS	Time of Max Occurrence days hr:min	Total Flood Volume 10 ⁶ ltr	Maximum Ponded Depth Meters
6159026	0.10	47.25	0 01:45	0.007	0.000
9066129	0.01	15.47	0 01:42	0.000	0.000
6159271	0.41	94.90	0 01:45	0.082	0.000
6159272	0.01	24.63	0 01:35	0.000	0.000
9066236	0.05	25.30	0 01:45	0.003	0.000
6159408	0.19	31.44	0 01:45	0.010	0.000
6159602	0.52	45.86	0 01:45	0.071	0.000
6159605	0.66	132.71	0 01:45	0.180	0.000
6159600	0.20	6.42	0 01:45	0.002	0.000
6159276	0.30	77.95	0 01:45	0.045	0.000
6159597	0.37	129.52	0 01:45	0.104	0.000

Tabla 1. Tabla de Excel donde se muestra las cámaras de inspección inundadas con el motor implícito.

ID	Flow (Total In) (L/s)	Is Ever Overflowing?
6160005	0.14	True
9087757	5.97	True
9087767	0.19	True
6158970	0.39	True
6159842	0.09	True
9066197	3.55	True
9226999	0.21	True
6159271	0.96	True
6159272	1.2	True
9066236	2.95	True
9066226	2.6	True
6159602	0.62	True

COMPARACIÓN DE SOFTWARE PROPIETARIO FRENTE A SOLUCIONES DE CÓDIGO ABIERTO PARA LA MODELACIÓN DE SISTEMAS DE ALCANTARILLADO Y DRENAJE URBANO...

6159605	0.69	True
6159609	0.03	True
6159608	0.01	True
6159701	0.42	True
6159597	0.53	True

En los siguientes perfiles, se observa una gran diferencia en la modelación entre los motores explícito e implícito. El motor explícito muestra los perfiles hidráulicos sin cambios significativos en las cabezas de presión ni en la salida del agua del sistema, incluso durante eventos de inundación. Esto significa que la gráfica permanece inalterada, sin reflejar el impacto del evento. En contraste, el motor implícito captura con precisión estos eventos de inundación. Las gráficas del motor implícito muestran cómo el agua sale del sistema y se convierte en escorrentía, proporcionando una representación más detallada y realista del comportamiento hidráulico durante inundaciones. Esta diferencia evidencia la mayor capacidad del motor implícito para modelar dinámicamente los eventos de escorrentía e inundación, ofreciendo una visión más completa y precisa del sistema.

Figura 64. Perfil en evento de inundación con el motor explícito.

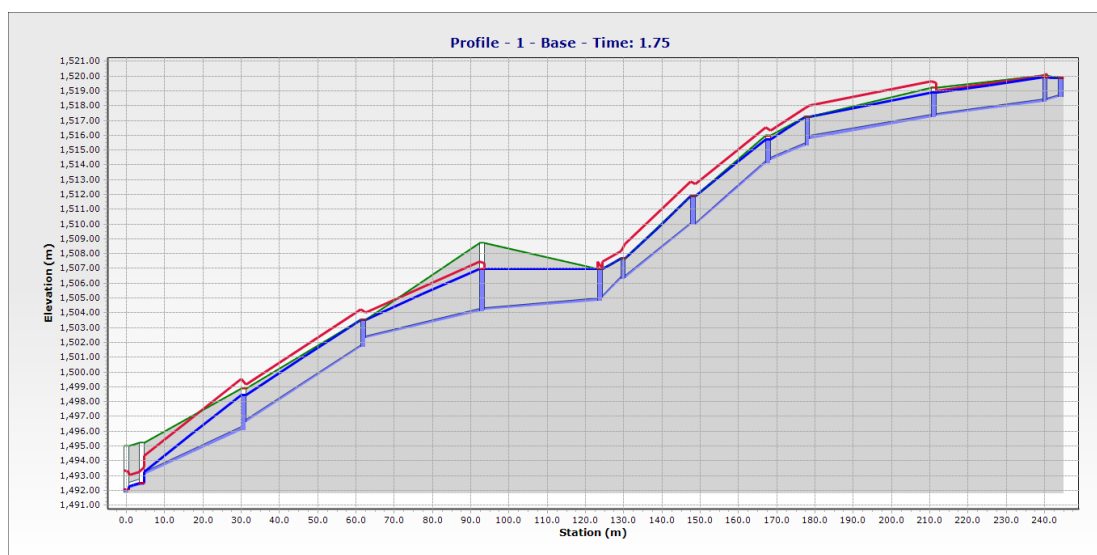
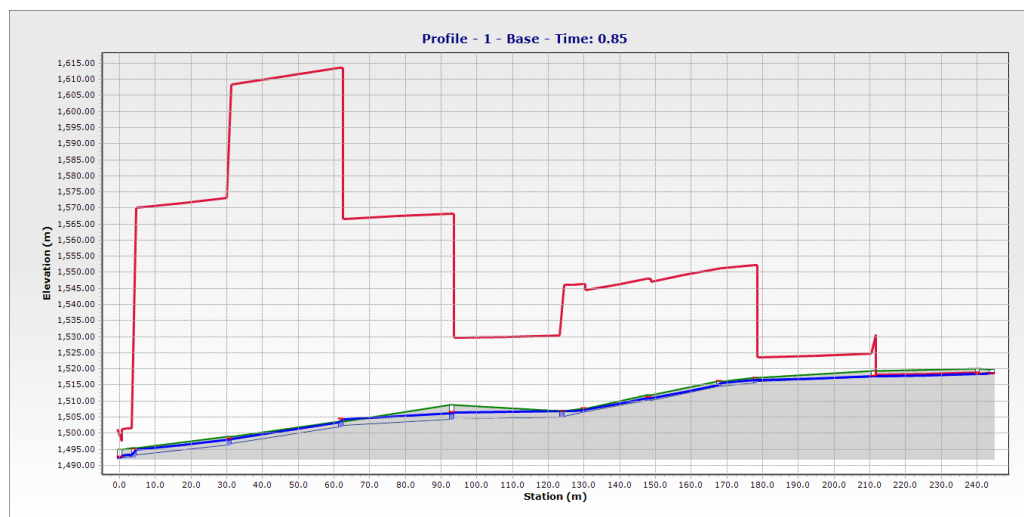


Figura 65. Perfil en evento de inundación con el motor implícito.

COMPARACIÓN DE SOFTWARE PROPIETARIO FRENTE A SOLUCIONES DE CÓDIGO ABIERTO PARA LA MODELACIÓN DE SISTEMAS DE ALCANTARILLADO Y DRENAJE URBANO...



Otro resultado importante que se permitió concluir en este escenario, fue hasta cuantos segundos los intervalos de tiempo (Time Steps), el programa empezaba a representar errores de continuidad, lo cual es importante para los motores explícito e implícito en SewerGEMS (Time Step Considerations in Bentley Storm and Sanitary Sewer Models, n.d.), el motor explícito tiende a requerir pasos de tiempo más pequeños para mantener la estabilidad de la simulación, lo que puede resultar en una mayor disipación numérica y gráficos menos detallados. Por otro lado, el motor implícito puede manejar pasos de tiempo más grandes, proporcionando una simulación más precisa y detallada de las condiciones hidráulicas, como se observa en los eventos de escorrentía e inundación.

Según la teoría, para que una modelación se considere inestable, debe sobrepasar el 5% de error en continuidad (Flow Continuity Error) (OpenFlows | Water Infrastructure - Troubleshooting Unstable SewerGEMS and CivilStorm Model Results Using the Implicit (SewerGEMS Dynami - Communities, n.d.). En este estudio, se encontró que el motor explícito comenzaba a presentar inestabilidad con un intervalo de tiempo (Time Steps) de 34 segundos. En contraste, el motor implícito solo empezó a mostrar inestabilidad a los 618 segundos. Esto indica que el motor implícito está mejor diseñado para manejar redes más complejas, permitiendo intervalos de tiempo mayores sin comprometer la estabilidad de la simulación.

Para el caso del motor explícito, con un intervalo de tiempo de 34 segundos, el error de continuidad fue del 10.5%. Por otro lado, para el motor implícito, con un intervalo de 618 segundos,

COMPARACIÓN DE SOFTWARE PROPIETARIO FRENTE A SOLUCIONES DE CÓDIGO ABIERTO PARA LA MODELACIÓN DE SISTEMAS DE ALCANTARILLADO Y DRENAJE URBANO...

el error de continuidad fue del 8.8%. Esto también indica que el motor explícito alcanza errores de continuidad mucho más rápido que el motor implícito.

Figura 66. Imagen donde muestra el error de continuidad del motor explícito con 34 segundos.

<ul style="list-style-type: none"> ▼ <General> Label Base ▼ Routing Quantity Flow Continuity Error (%) -10.5 ▼ Runoff Quantity Runoff Continuity Error (%) -0.2 ▼ System Stats Average Iterations Per Step 2,23873691423035 Not Converging (%) 1.0 	
---	--

Figura 67. Imagen donde muestra el error de continuidad del motor implícito con 618 segundos.

Calculation Executive Summary			
Scenario			
Label	Base		
Storm Event			
Label	Base Rainfall Runoff	Return Event	(N/A) years
Global Storm Event	<None>		
Calculation Executive Summary			
Total Inflow Volume	84,783,611.3 L	Total System Volume Change	-3,575.9 L
Total System Outflow Volume	57,489,608.4 L	Continuity Error	8.8 %
Total System Overflow Volume	56,355,610.7 L	Total Pond Infiltration Volume	0.0 L
Total Gutter Volume Change	(N/A) L	Total N-R Iterations	3709

7 Conclusiones

Es evidente la necesidad urgente de implementar soluciones en el proyecto "Parques del Río Norte". Los escenarios de modelación han demostrado que, independientemente de si las precipitaciones son reales o basadas en curvas IDF (Intensidad-Duración-Frecuencia), el sistema de alcantarillado tiende a colapsar debido a la existencia de una única red de transporte de aguas combinadas. Esta red maneja tanto aguas pluviales como residuales domésticas, lo cual agrava el problema debido a sus condiciones fisicoquímicas y bacteriológicas.

Igualmente, el tener aguas combinadas en la zona de estudio limitará el tipo de soluciones basadas en la naturaleza, de tipo SUDS que puedan implementarse debido a la carga orgánica y bacteriológica de esta. Lo anterior significa un reto adicional para los tomadores de decisiones en la ciudad o en la empresa de servicios públicos en torno a comenzar a gestionar la separación de las redes de alcantarillado en esta parte de la red, y en general de la ciudad.

La correcta selección de la tipología de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) a implementar como posible solución a las inundaciones en la zona de estudio implicará, como primera medida, la separación de las redes de alcantarillado. Esto permitirá un manejo más eficiente y seguro de las aguas pluviales y residuales. Esta estrategia no solo mejorará la capacidad del sistema para manejar eventos de lluvia intensa, sino que también reducirá los riesgos asociados con la contaminación orgánica proveniente de las aguas residuales.

La no separación de las aguas residuales de las aguas pluviales, o la mala selección de las tipologías de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) a implementar en el proyecto "Parques del Río Norte", podría llevar al fracaso de estas soluciones y agravar los problemas de contaminación y mantenimiento de los SUDS.

Es crucial considerar los efectos del cambio climático en las lluvias dentro de este proyecto. Las proyecciones indican que los eventos de lluvia intensa serán más frecuentes y severos, aumentando el riesgo de inundaciones y poniendo más presión sobre el sistema de alcantarillado, ya vulnerable. Incluir estas consideraciones en el diseño y planificación del proyecto permite desarrollar estrategias más robustas y adaptativas. Modelar las lluvias teniendo en cuenta el cambio

COMPARACIÓN DE SOFTWARE PROPIETARIO FRENTE A SOLUCIONES DE CÓDIGO ABIERTO PARA LA MODELACIÓN DE SISTEMAS DE ALCANTARILLADO Y DRENAJE URBANO...

climático es vital para anticipar y mitigar los impactos de eventos extremos, garantizando la protección de la infraestructura, la salud pública y el medio ambiente. La adaptación al cambio climático es fundamental para asegurar la sostenibilidad y resiliencia del proyecto a largo plazo.

Se debe reconocer que debido a la ausencia de instrumentación y mediciones sobre las redes de alcantarillado, no fue posible realizar la calibración, ni la validación de las simulaciones presentadas en esta tesis, lo cual aumenta de manera apreciable la incertidumbre y replicabilidad de los modelos y simulaciones usadas en este proyecto; sin embargo, y a pesar de estas limitaciones, los escenarios modelados han permitido extraer conclusiones valiosas sobre el comportamiento del sistema de alcantarillado, identificando áreas críticas y posibles soluciones para mejorar su eficiencia y aumentar la resiliencia del drenaje urbano, así como una guía valiosa para una adecuada selección de las tipologías de SUDS a implementar.

El modelo hidráulico 1D ha proporcionado conclusiones significativas a partir de los escenarios evaluados en dos softwares: EPA-SWMM y SewerGEMS. Si se busca un motor de cálculo sencillo y eficiente, EPA-SWMM es una opción viable debido a su código abierto. Por otro lado, SewerGEMS, al ser un software propietario, requiere una licencia y presenta limitaciones según el tipo de licencia. En este proyecto se utilizó una licencia educativa que permitió la modelación y comparación. Los resultados mostraron que las diferencias en el motor explícito de ambos programas eran prácticamente insignificantes, sugiriendo que EPA-SWMM puede ser una alternativa eficaz y económica a SewerGEMS para ciertos tipos de modelaciones, en particular para unos tamaños o complejidades de tamaño de redes.

En el escenario que comparó los motores explícito e implícito (escenario 5), se concluye que, para redes grandes y complejas, es preferible utilizar el motor implícito. Este motor requiere intervalos de tiempo mayores y, según la teoría, necesita una red más robusta, ya que utiliza todas las ecuaciones simultáneamente. En nuestro caso, el motor implícito presentó errores de continuidad al ajustar el intervalo de tiempo a 618 segundos (10 minutos y 18 segundos). En cambio, el motor explícito comenzó a mostrar errores con un intervalo de 34 segundos, lo que sugiere que es más adecuado para redes menos complejas. Además, el motor implícito proporciona soluciones más precisas al considerar múltiples factores en su análisis.

COMPARACIÓN DE SOFTWARE PROPIETARIO FRENTE A SOLUCIONES DE CÓDIGO ABIERTO PARA LA MODELACIÓN DE SISTEMAS DE ALCANTARILLADO Y DRENAJE URBANO...

Este trabajo no solo evaluó el desempeño de los softwares de código libre y propietario, sino que también encontró soluciones prácticas para el proyecto "Parques del Río Norte". La comparación entre estos programas demostró su utilidad y eficacia en la identificación de soluciones para las inundaciones. Los resultados destacan la capacidad de ambos softwares para proporcionar datos precisos y valiosos, lo cual es crucial para desarrollar estrategias efectivas en la gestión de aguas pluviales y residuales en el proyecto.

La elección entre software libre y propietario para la modelación de redes de alcantarillado urbano dependerá de varios factores clave. El uso de software libre es recomendable cuando se busca flexibilidad, acceso a modificaciones y costos reducidos. Este tipo de software es ideal para proyectos en los que se requiere personalización y adaptación a necesidades específicas. Además, es una buena opción para instituciones educativas o proyectos con presupuesto limitado, ya que permite la colaboración y el intercambio de conocimientos entre usuarios. Por su parte, el uso de software propietario será más adecuado cuando se necesita soporte técnico especializado, funcionalidades avanzadas y una interfaz más intuitiva. Lo que concluimos con este trabajo de grado es que estos programas suelen ofrecer herramientas robustas y actualizaciones constantes, lo que puede ser beneficioso para proyectos complejos que requieren una alta precisión en las simulaciones. Además, si la organización cuenta con los recursos para invertir en licencias y mantenimiento, el software propietario puede proporcionar soluciones más integradas y completas.

En términos de la selección de el motor explicito vs el motor de cálculo implícitos puestos a prueba en este proyecto de grado, se podría concluir entre otros que el motor explícito de calculo que presenta el software EPA-SWMM presenta ventajas como su simplicidad, es más fácil de entender y usar, ideal para usuarios sin una experiencia técnica avanzada. Este a su vez, permite una rápida implementación ya que genera simulaciones rápidas, lo que es útil para evaluaciones preliminares. Es importante recalcar que dentro de las limitaciones de este motor explicito podríamos resaltar su limitación con la estabilidad del método numérico, este método de resolución tiene a presentar problemas de estabilidad en redes complejas o con condiciones cambiantes,

COMPARACIÓN DE SOFTWARE PROPIETARIO FRENTE A SOLUCIONES DE CÓDIGO ABIERTO PARA LA MODELACIÓN DE SISTEMAS DE ALCANTARILLADO Y DRENAJE URBANO...

especialmente con intervalos de tiempo mas altos, con lo cual las simulaciones en condiciones de redes complejas, los resultados pueden ser menos precisos o con mayor incertidumbre.

El motor implícito del SewerGems, presentó una mayor estabilidad, demostrando así su capacidad de manejar redes más grandes y complejas sin problemas de convergencia, lo que es crucial para simular condiciones de flujo dinámico. Se puede concluir así mismo, que es un motor de resolución mas preciso ya que considera todas las ecuaciones simultáneamente, lo que permite una mejor representación de las condiciones hidráulicas. Esta ganancia en precisión lleva consigo desventajas como el alto costo de los programas, no sólo de adquisición de licencias si no también de sus costos anuales de mantenimiento, así como la complejidad misma del software, que requiere un mayor conocimiento técnico para la configuración y el uso efectivo.

8 Referencias

Arango, L. F. (2022, September 1). Parques del Río Norte recibe apoyo internacional para su ejecución por parte del C40 - Alcaldía de Medellín. Alcaldía De Medellín. <https://www.medellin.gov.co/es/sala-de-prensa/noticias/parques-del-rio-norte-recibe-apoyo-internacional-para-su-ejecucion-por-parte-del-c40/>

Crispino, G., Gisonni, C., & Iervolino, M. (2014). Flood hazard assessment: comparison of 1D and 2D hydraulic models. *International Journal of River Basin Management*, 13(2), 153–166. <https://doi.org/10.1080/15715124.2014.928304>

Chintana. (2024, February 14). OpenFlows SewerGEMS | Bentley Systems | Infrastructure Engineering Software Company. Bentley Systems | Infrastructure Engineering Software Company. <https://es-la.bentley.com/software/openflows-sewergems/>

Construcción Parques del Rio Norte - Alcaldía de Medellín. (2022, January 12). Alcaldía De Medellín. <https://www.medellin.gov.co/es/proyectos/construccion-parques-del-rio-norte/>

Colombiano, E. (2023, March 19). Las lluvias del sábado en Medellín dejaron cuatro emergencias | El Colombiano. www.elcolombiano.com. <https://www.elcolombiano.com/medellin/las-lluvias-del-sabado-en-medellin-dejaron-cuatro-emergencias-HI20825763>

¿Cuál es la Diferencia entre los Motores Implícitos y SWMM? (n.d.). (C) Copyright 2017. <https://docs.bentley.com/LiveContent/web/Subsurface%20Utilities%20CONNECT%20Edition%20Help-v2/en/GUID-2BBC37C0185547259469A15643BE13D5.html>

Desde la calidad hasta la disponibilidad, el efecto de este fenómeno en los recursos hídricos es cada vez más visible. ¿En qué impacta y cómo se debe afrontar? (2024, March 21). National Geographic. <https://www.nationalgeographicla.com/medio-ambiente/2024/03/como-afecta-el-cambio-climatico-al-agua-que-hay-en-el-mundo>

COMPARACIÓN DE SOFTWARE PROPIETARIO FRENTE A SOLUCIONES DE CÓDIGO ABIERTO PARA LA MODELACIÓN DE SISTEMAS DE ALCANTARILLADO Y DRENAJE URBANO...

Environmental Protection Agency. (2022). Storm Water Management Model User's Manual Version 5.2 . U.S. Environmental Protection Agency. <https://www.epa.gov/water-research/storm-water-management-model-swmm#documentation>

García, T., García, T., & García, T. (2015, July 31). Medellín: Arquitectura y urbanismo como herramientas para el desarrollo social. El País. https://elpais.com/elpais/2015/07/31/seres_urbanos/1438322400_143832.html

Infraestructura verde urbana | Biodiversidad 2020. (n.d.). <http://reporte.humboldt.org.co/biodiversidad/2020/cap4/402/#seccion2>

Leandro, J., Chen, A. S., Djordjević, S., & Savić, D. (2009). Comparison of 1D/1D and 1D/2D coupled (Sewer/Surface) hydraulic models for urban flood simulation. *Journal of Hydraulic Engineering*, 135(6), 495–504. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)hy.1943-7900.0000037](https://doi.org/10.1061/(asce)hy.1943-7900.0000037)

La Agencia De La Onu Para Los Refugiados, A.-. (2024, May 24). Inundaciones causadas por la crisis climática provocan nuevos desplazamientos. ACNUR. <https://www.acnur.org/noticias/historias/inundaciones-causadas-por-la-crisis-climatica-provocan-nuevos-desplazamientos>

Lameche, E. K., Boutaghane, H., Saber, M., Abdrabo, K. I., Bermad, A. M., Djeddou, M., Boulmaiz, T., Kantoush, S. A., & Sumi, T. (2023). Urban flood numerical modeling and hydraulic performance of a drainage network: a case study in Algiers, Algeria. *Water Science & Technology*, 88(7), 1635–1656. <https://doi.org/10.2166/wst.2023.277>

La transformación urbana de Medellín: un caso de estudio. (n.d.). <https://www.archdaily.co/co/1015321/la-transformacion-urbana-de-medellin-un-caso-de-estudio>

MODELACIÓN HIDROLÓGICA - IDEAM. (n.d.). <http://ideam.gov.co/web/agua/modelacion-hidrologica>

Medellín modelo de transformación urbana pui proyecto urbano integral. (2015, May 26). Issuu. https://issuu.com/urbameafit/docs/medell__n_modelo_de_transformaci__n

COMPARACIÓN DE SOFTWARE PROPIETARIO FRENTE A SOLUCIONES DE CÓDIGO ABIERTO PARA LA MODELACIÓN DE SISTEMAS DE ALCANTARILLADO Y DRENAJE URBANO...

Nataly, M. R. (n.d.). Urbanismo social en Medellín: una aproximación a partir de la utilización estratégica de los derechos. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0121-51672014000200011

Observatory, J. S. N. E. (2017, November 9). Un nuevo estudio prevé un incremento de los daños excedentes de nitrógeno como resultado de los cambios en las precipitaciones. National Geographic. <https://www.nationalgeographic.es/medio-ambiente/2017/07/la-intensificacion-de-las-precipitaciones-provocara-un-aumento-de-la-contaminacion-del-agua-en-el-futuro>

OpenFlows | Water Infrastructure - Troubleshooting unstable SewerGEMS and CivilStorm model results using the Implicit (SewerGEMS Dynami - Communities. (n.d.). https://bentleysystems.service-now.com/community?id=kb_article&sysparm_article=KB0013967

Storm Water Management Model (SWMM) | US EPA. (2024, February 27). US EPA. <https://www.epa.gov/water-research/storm-water-management-model-swmm>

Saldarriaga, J., Zambrano, J., Herrán, J., & Iglesias-Rey, P. L. (2021). Layout selection for an optimal sewer network design based on land topography, streets network topology, and inflows. *Water*, 13(18), 2491. <https://doi.org/10.3390/w13182491>

Santos, J. (2023, December 9). 21 lugares turísticos imperdibles para visitar en Medellín. Visitar Medellín. <https://visitarmedellin.com/lugares-turisticos-para-visitar/>

Time step considerations in Bentley Storm and sanitary sewer models. (n.d.). (C) Copyright 2017. <https://docs.bentley.com/LiveContent/web/Bentley%20SewerCAD%20SS5-v1/en/GUID-6EB987533FAC43BB80B0F67DE8586047.html>

Wpadmin. (2024, January 22). OpenFlows SewerGEMS - Bentley | Aufiero Informática. Bentley. <https://bentley.aufieroinformatica.com/openflows-sewergems-es/>

Xie, H., Yan-Ru, W., Wang, L., Luo, W., Zhou, W., Zhang, H., Yan, Y., & Liu, J. (2019). Comparing simulations of green roof hydrological processes by SWMM and HYDRUS-1D. *Water Science & Technology: Water Supply*, 20(1), 130–139. <https://doi.org/10.2166/ws.2019.140>

COMPARACIÓN DE SOFTWARE PROPIETARIO FRENTE A SOLUCIONES DE CÓDIGO ABIERTO PARA LA MODELACIÓN DE SISTEMAS DE ALCANTARILLADO Y DRENAJE URBANO...

Zuluaga, D. O. (2021, June 12). Un muerto y 23 viviendas evacuadas: balance de las lluvias en el Aburrá | El Colombiano. www.elcolombiano.com.
<https://www.elcolombiano.com/antioquia/medellin/balance-de-las-lluvias-y-las-inundaciones-en-medellin-y-en-el-valle-de-aburra-JG15134580>